



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LAANILAN BIOVOIMALAITOKSEN
MONIPOLTTOAINETUHKAN KOOSTUMUS JA
HYÖTYKÄYTTÖ**

Henna Tihinen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2021



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LAANILAN BIOVOIMALAITOKSEN
MONIPOLTTOAINETUHKAN KOOSTUMUS JA
HYÖTYKÄYTTÖ**

Henna Tihinen

Ohjaajat: Heikki Karppimaa, Satu Pitkäaho, Minna Tiainen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ

Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (diplomityö)		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Ympäristötekniikka			
Tekijä Tihinen, Henna		Työn ohjaaja yliopistolla Pitkäaho S, TkT; Tiainen M, FT	
Työn nimi			
Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkan koostumus ja hyötykäyttö			
Opintosuunta Teollisuuden ympäristötekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Maaliskuu 2021	Sivumäärä 107 s, 6 liitettä
Tiivistelmä			
<p>Diplomityön tavoitteena oli tutkia Laanilan biovoimalaitoksella muodostuvan monipolttoainetuhkan koostumus sekä saatujen kemiallisten analyysitulosten perusteella selvittää monipolttoainetuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia. Työ toteutettiin käyttäen kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Tutkimuskysymykset, joihin työssä vastataan ovat:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Mikä on polttoainejakauman vaikutus Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkan ominaisuuksiin?2. Mitkä ovat edellytykset, että Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhka täyttää hyödyntämislainsäädännön vaatimukset?3. Millaisilla edellytyksillä Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkaa voidaan hyötykäyttää? <p>Työssä perehdyttiin Laanilan biovoimalaitokseen ja siellä käytettäviin polttoaineisiin (biopolttoaine, turve, SRF) sekä muodostuviin tuhkatuotteisiin (pohja-, kattila- ja lentotuhka). Lisäksi käsiteltiin kirjallisuuslähteiden pohjalta yleisesti tuhkan muodostumista ja koostumusta sekä tutustuttiin dolomiitin käyttöön lisäaineena leijukerrospoltossa. Kirjallisuusosion lopussa tarkasteltiin myös tuhkien hyötykäyttöön liittyvää lainsäädäntöä, joiden perusteella kokeellisen tutkimuksen tulokset käsiteltiin.</p> <p>Monipolttoainetuhkan koostumusta tutkittiin näytteenottosuunnitelman mukaisesti. Tuhkatuotteista otetuista osanäytteistä koottiin kahden viikon välein kokoomanäytteet. Monipolttoainetuhkanäytteitä analysoitiin sekä akkreditoidussa laboratoriossa että tutkimuslaboratorioissa MARA-, lannoite- ja kaatopaikka-asetuksen määrittämällä kemiallisilla analyysimenetelmillä. Polttoainejakauman tietoja kerättiin myös vastaavissa kahden viikon jaksoissa, jotta varmistuttiin kyseisen ajanjakson polttoainetaseesta ja sen vaikutuksista monipolttoainetuhkan koostumukseen.</p> <p>Tutkimustuloksia kerättiin noin kolmen kuukauden ajalta. Kemialliset analyysitulokset osoittivat, että pohjatuhka täyttää MARA-asetuksen laatuvaatimukset, joten sitä voidaan hyötykäyttää maarakentamisessa. Lento- ja kattilatuhka eivät kemiallisten analyysitulosten perusteella täyttäneet kaikkia MARA-asetuksen laatuvaatimuksia, mutta ovat hyötykäyttökelpoisia maarakennuskohteissa, jotka täyttävät MARA-asetuksen poikkeusehdot. Kemiallisten analyysitulosten perusteella kaikki biovoimalaitoksen tuhkatuotteet täyttävät lannoiteasetuksen määrittämät laatuvaatimukset metsätuhkalannoitteelle muutamia pistemäisiä pitoisuusraja-arvon ylityksiä lukuun ottamatta lento- ja kattilatuhkan osalta. Tutkimustulosten perusteella tuhkatuotteita ei ole tarpeellista tai kannattavaa loppusijoittaa kaatopaikalle.</p> <p>Työn tutkimustulokset tukevat kirjallisuudesta saatuja lähtötietoja tuhkan muodostumisesta ja polttoaineiden vaikutuksista tuhkan kemialliseen koostumukseen. Tutkimustulokset ovat sovellettavissa vastaavissa voimalaitoksissa, jotka ovat polttoaineteholtaan noin 215 MW ja käyttävät polttoaineina biopolttoainetta, turvetta ja SRF-polttoainetta.</p> <p><i>Asiasanat: Biovoimalaitos, leijukerrospoltto, pohjatuhka, kattilatuhka, lentotuhka, tuhkan hyötykäyttö</i></p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Master's Thesis) Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Tihinen, Henna		Thesis Supervisor Pitkääho S, D. Sc (Tech); Tiainen M, PhD	
Title of Thesis Composition and utilization of multi-fuel ash from the Laanila biopower plant			
Major Subject Industrial Environmental Technology	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date March 2021	Number of Pages 107 s., 6 App.
<p>Abstract</p> <p>The aim of the thesis was to study the composition of the multi-fuel ash formed at the Laanila biopower plant and to find out the utilization possibilities of the multi-fuel ash based on the obtained results of the chemical analyses. The thesis was carried out using a quantitative research method. The thesis will answer to the following research questions:</p> <ol style="list-style-type: none">1. What is the effect of fuel distribution on the properties of multi-fuel ash at the Laanila biopower plant?2. What are the conditions for the Laanila biopower plant's multi-fuel ash to meet the requirements of the recovery legislation?3. Under what recovery conditions the multi-fuel ash from the Laanila biopower plant can be utilized? <p>The thesis focused on the Laanila biopower plant, the fuels that are used there (biofuel, peat, SRF) and the resulting ash products (bottom ash, boiler ash and fly ash). In addition, the formation and composition of ash were generally discussed based on the literature sources, and the use of dolomite as an additive in fluidized bed combustion was studied briefly. The thesis also reviewed the legislation related to the utilization of ashes, based on which the results of the experimental study were processed.</p> <p>The composition of the multi-fuel ash was determined according to the sampling plan with aggregate samples performed every two weeks. Multi-fuel ash samples were analyzed both in an accredited laboratory and in research laboratories using the analytical methods specified by the MARA, Fertilizer and Landfill Regulations. Fuel distribution data were also collected at corresponding two-week periods to determine the fuel balance for those periods and its effects on the properties of the multi-fuel ash.</p> <p>The results of the experimental study were collected over a period of three months. The results of the chemical analyses showed that the bottom ash complies with the quality requirements of the MARA Regulation and is usable as earth construction material. Based on the results of the chemical analyses the fly ash and boiler ash did not meet all the quality requirements of the MARA Regulation. However, fly ash and boiler ash are both usable as earth construction material if the exception conditions of the MARA Regulation are met. Based on the results of chemical analyses all ash products from biopower plant meet the quality requirements set by the Fertilizer Regulation. Only in a few chemical analyses of fly ash and boiler ash show that concentration limit values are exceeded. The research results obtained showed that it is not necessary or profitable to dispose the ash products to the landfill.</p> <p>The research results of the work support the initial data obtained from the literature on the formation of ash and the effects of fuels on the chemical composition of ash. The research results are applicable to similar power plants with fuel capacity of approximately 215 MW using biofuels, peat and SRF as fuels.</p> <p><i>Keywords: Biopower plant, fluidized bed combustion, bottom ash, boiler ash, fly ash, utilization of ash</i></p> <p>Additional Information</p>			

ALKUSANAT

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää Laanilan biovoimalaitoksella muodostuvan monipolttoainetuhkan koostumus sekä hyötykäyttömahdollisuus. Lähtökohtana monipolttoainetuhkan hyötykäytölle oli välttää tuhkien loppusijoittaminen. Työ on toteutettu Oulun Energia Oy:lle. Työn suoritus eteni nopeasti ja työ valmistui alkuperäisen aikataulun mukaisesti kuuden kuukauden aikana.

Haluan kiittää Oulun Energian puolelta työnohjaajaani Heikki Karppimaata mielenkiintoisesta diplomityönaiheesta ja ajatusten jakamisesta työtä tehdessä. Oulun Energialta haluan kiittää myös ympäristöasiantuntija Eila Latolaa, joka neuvoi ja opasti minua työni eri vaiheissa. Lisäksi Oulun Energialta haluan kiittää myös muita työntekijöitä, jotka neuvoivat ja auttoivat minua, milloin missäkin asiassa.

Oulun yliopiston puolelta haluan antaa kiitokset ohjaajilleni Satu Pitkäaholle sekä Minna Tiaiselle, jotka antoivat kannustavaa palautetta ja asiantuntevia kommentteja työtä tehdessäni.

Kiitokset myös läheisille kannustuksesta ja tuesta!

Oulussa 25.2.2021

Henna Tihinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO.....	7
2 OULUN ENERGIA	9
2.2 Laanilan biovoimalaitos	9
2.3 Laanilan biovoimalaitoksella käytettävät polttoaineet	13
2.3.1 Biopolttoaine	14
2.3.2 Turve	15
2.3.3 Kiinteä kierrätyspolttoaine (SRF)	16
3 TUHKA ENERGIAN TUOTANNOSSA.....	21
3.2 Tuhkan muodostuminen ja koostumus.....	21
3.2.1 Tuhkan muodostumismekanismit	22
3.2.2 Polttoaineiden tuhkapitoisuudet	23
3.2.3 Dolomiitin käyttö lisäaineena leijukerros poltossa	24
4 TUHKATUOTTEET LAANILAN BIOVOIMALAITOKSELLA	27
4.2 Pohjatuhka	28
4.3 Kattilatuhka	28
4.4 Lentotuhka.....	29
5 TUHKIEN HYÖDYNTÄMISLAINSÄÄDÄNTÖ.....	31
5.2 Ympäristönsuojelulaki 527/27.6.2014.....	31
5.3 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017	32
5.4 Lannoitevalmistelaki 539/29.6.2006	32
5.5 Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 24/11.....	33
5.6 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2.5.2013.....	34
5.7 Jätelaki 646/17.6.2011	35
5.8 Valtioneuvoston asetus jätteistä 179/2012	36
5.9 Jäteverolaki 1126/17.12.2010.....	36
5.10 REACH-asetus	36
6 NÄYTTEENOTTO JA LABORATORIOANALYYSIT	38

6.2 Näytteenottosuunnitelma	39
6.3 Kuvaus näytteenotosta	41
6.4 Laboratorioanalyysi: Kuiva-ainepitoisuus	42
6.5 Polttoainetase	45
7 TULOSTEN TARKASTELU	48
7.2 Pohjatuhkan analyysitulosten tarkastelu	49
7.3 Kattilatuhkan analyysitulosten tarkastelu	51
7.4 Lentotuhkan analyysitulosten tarkastelu	56
7.5 Kuiva-ainepitoisuusanalyysin tulosten analysointi	61
7.6 Monipolttoainetuhkan hyötykäyttömahdollisuudet	63
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	67
9 YHTEENVETO	70
10 LÄHDELUETTELO	73

LIITTEET:

Liite 1. MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liite 2 (Haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerrosraksuus maarakentamiskohteessa).

Liite 2. Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) liite 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset).

Liite 3. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset akkreditoidusta laboratoriosta.

Liite 4. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset tutkimuslaboratoriosta.

Liite 5. Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriossa saadut analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuudelle.

Liite 6. Akkreditoidun laboratorion analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksille.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

GWh	gigawattitunti
h/a	tuntia vuodessa
MJ/kg	megajoulea kilossa
MW	megawatti
mm	millimetri
mg/kg	milligrammaa kilossa
PVC	polyvinyylikloridi
p-%	painoprosentti
SRF	kiinteä kierrätyspolttoaine (Solid Recovered Fuel)
t/a	tonnia vuodessa
t/h	tonnia tunnissa
t/vrk	tonnia vuorokaudessa
μm	mikrometri

1 JOHDANTO

Laanilan biovoimalaitos on Oulun Energian vuonna 2020 valmistunut rakennushanke, jossa polttoaineina käytetään pääasiassa biopolttoainetta (puuta), turvetta ja kiinteää kierrätyspolttoainetta (SRF). Prosessissa syntyy polttoaineiden palamisen seurauksena monipolttoainetuhkaa, jonka koostumuksesta tai hyötykäyttömahdollisuuksista aikaisempaa tutkimusta ei ole tehty. Selvitys monipolttoainetuhkan koostumuksesta ja hyötykäyttömahdollisuuksista on jätteistä annetun valtioneuvoston asetuksen (VNa 179/2012) liitteen 4 (Jäteluettelo: yleisimmät jätteet sekä vaaralliset jätteet) perusteella toteutettava, sillä monipolttoainetuhka määritellään jätteeksi. Jätelain (L 646/17.6.2011) perusteella toiminnassa tulee aina noudattaa etusijajärjestystä parhaalla mahdollisella tavalla. Etusijajärjestyksellä tarkoitetaan, että ensisijaisesti tulee pyrkiä vähentämään jätteeksi määriteltyjen tuotteiden syntymistä ja haitallisuutta. Mikäli jätettä kuitenkin syntyy, kuten tässä tapauksessa monipolttoainetuhkaa, tulee jäte kierrättää tai hyödyntää muulla tavoin. Jos todetaan, ettei jätteelle löydy hyötykäyttömahdollisuutta tai sitä ei voida kierrättää, niin siinä tapauksessa jäte loppusijoitetaan.

Työn tavoitteena on määrittää monipolttoainetuhkan laatu ja laatia yhtenäinen näytteenottosuunnitelma, joka edistää näytteenoton systemaattisuutta sekä tulosten vertailukelpoisuutta. Erityisesti työssä kiinnitetään huomiota polttoainejakaumaan eli vaikuttavatko biovoimalaitoksen kiertoleijukattilaan syötettyjen polttoaineiden erilaiset osuudet monipolttoainetuhkan ominaisuuksiin tai hyödyntämismahdollisuuksiin. Lisäksi työn tavoitteena on selvittää, miten Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkaa on mahdollista hyödyntää.

Tavoitteisiin perustuvat tutkimuskysymykset, joihin tässä työssä vastataan ovat:

1. Mikä on polttoainejakauman vaikutus Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkan ominaisuuksiin?
2. Mitkä ovat edellytykset, että Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhka täyttää hyödyntämislainsäädännön vaatimukset?
3. Millaisilla edellytyksillä Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkaa voidaan hyötykäyttää?

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta, kokeellisesta tutkimusosiosta sekä kemiallisten tutkimustulosten analysoimisesta ja tarkastelusta. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään työn taustaan, joka luo pohjan kokeellisen tutkimuksen suorittamiselle. Kokeellisessa tutkimusosiossa käydään läpi näytteenottosuunnitelma, käytetyt tutkimusmenetelmät ja polttoainejakauma. Saadut tutkimustulokset esitellään ja avataan mitä ne tarkoittavat hyötykäytön kannalta. Lisäksi saatuja kemiallisia analyysituloksia verrataan lainsäädännön antamiin raja-arvoihin sekä arvioidaan siten monipolttoainetuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia.

Työssä käsitellään Laanilan biovoimalaitoksen kattila-, lento- ja pohjatuhkaa. Tutkimusmenetelmä, jota työssä käytetään, on kvantitatiivinen. Keskeisiä lähteitä tässä työssä ovat Laanilan biovoimalaitoksen tuhkien kokeellisesta tutkimuksesta saadut kemialliset analyysitulokset sekä lainsäädäntö.

2 OULUN ENERGIA

Oulun Energia tarjoaa energiapalveluita niin yksityisasiakkaille, yrityksille kuin yhteiskunnallekin. Toiminta ei rajaudu pelkästään vain lämmön tai sähkön tuotantoon, jakeluun ja myyntiin, vaan kattaa myös raaka-aineiden tuotannon. Oulun Energian emoyhtiön omistaa Oulun kaupunki, kun taas Oulun Energian tytäryhtiöt ovat emoyhtiön omistamia. Oulun Energian perustusvuosi on 1889. (Oulun Energia 2020)

Oulun Energian voimalaitoksissa käytettävistä energianlähteistä tärkeimpiä ovat turve, puu, vesi ja jäte. Puuta ja turvetta käytetään energianlähteenä Toppilan voimalaitoksissa, joissa tuotetaan sähköä ja kaukolämpöä. Polttoaineteholtaan Toppila 1 on 267 megawattia (MW) ja Toppila 2 on 315 MW. Energianlähteenä vettä käytetään Merikosken vesivoimalaitoksella, joka tuottaa sähköä (sähköteho 40 MW). Jätettä käytetään energianlähteenä Laanilan ekovoimalaitoksella, jossa tuotetaan sähköä ja lämpöä. Polttoaineteholtaan Laanilan ekovoimalaitos on 53 MW. Oulun Energian uusimmat rakennushankkeet tukevat yrityksen kehitystä kiertotaloudessa. Laanilan biovoimalaitos on yksi näistä uusimmista rakennushankkeista, joka käyttää energianlähteenä puuta, turvetta ja kiinteää kierrätyspolttoainetta (SRF). Laanilan biovoimalaitoksella tuotetaan sähköä, lämpöä ja prosessihöyryä, se tulee korvaamaan käytöstä poistuvan Toppila 1 -voimalaitoksen. Polttoaineteholtaan Laanilan biovoimalaitos on 215 MW. Kiinteää kierrätyspolttoainetta Laanilan biovoimalaitoksen polttoaineeksi tuotetaan Oulun Energian jätteiden lajittelulaitoksella, jonka toiminta on alkanut myös syksyllä 2020. (Oulun Energia 2020)

2.2 Laanilan biovoimalaitos

Pöyry Finland on tehnyt Laanilan biovoimalaitoksen tarkkailusuunnitelman (viite 101008551–001) ja biovoimalaitoksen esittely perustuu tähän raporttiin. Laanilan biovoimalaitos tuottaa kaukolämpöä, prosessihöyryä sekä sähköä, voimalaitoksen polttoaineteho on 215 MW. Mikäli huoltoseisokkia ei oteta huomioon, voimalaitos on jatkuvassa toiminnassa vuoden ajasta riippumatta. Biovoimalaitoksen alueella sijaitsee voimalaitoksen toimintaan sisältyvät polttoaineen vastaanottoasema sekä varastointi- ja käsittelyjärjestelmät, kattila- ja turbiinilaitokset, savukaasujen pudistuslaitteistot ja lämmöntalteenottojärjestelmä sekä tuhkasiilot ja piippu. Lisäksi biovoimalaitoksen alueelle tullaan sijoittamaan polttoainerterminaali, johon on mahdollista varastoida

biopolttoainetta sekä runkoina että hakkeena. (Pöry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Biovoimalaitoksella käytettävä jäähdytysvesi on peräisin Oulujoesta. Jäähdytysvedenottoa varten on tarkoituksena rakentaa uusi pumppaamo Oulujoen rannalle sekä jäähdytysvesiputki. Pumppaamo tullaan varustamaan välillä ja suodattimilla. Lisäksi rakennetaan uusi purkuputki, joka palauttaa biovoimalaitoksella käytetyn jäähdytysveden Oulujokeen. (Pöry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Biovoimalaitoksen teknisiä tietoja on koottu alla olevaan taulukkoon (Taulukko 1). Taulukkoon merkityt tiedot ovat arvioita sekä kuvaavat hetkellisiä käyttötilanteen arvoja. Lämmöntalteenoton arvo taulukossa on arvio lämmöntalteenottopotentialista tilanteessa, jolloin palamisilmaa kostutetaan ja kaukolämpöveden paluulämpötila on alhaisin. Voimalaitoksen tehoihin vaikuttaa vuositasolla muun muassa savukaasun lämmöntalteenotto. Lisäksi prosessihöyrytuotannon vaikutusta ei ole otettu huomioon määritettäessä sähkö- ja kaukolämpötehoja. (Pöry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Taulukko 1. Laanilan biovoimalaitoksen tekniset tiedot (mukaillen Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020).

Polttoaineteho	215 MW
Sähköteho	75 MW _e (brutto)
Lämpöteho	Kaukolämpö 175 MW (netto) (poissulkien prosessihöyry) - lämmöntalteenotto 55 MW Prosessihöyry 0–50 MW
Polttoaineet	Biopolttoaine (puu) Turve Kiinteä kierrätyspolttoaine (SRF) Tehtaiden prosessikaasu ja noki Käynnistys- ja varapolttoaineena on käytössä raskasta ja/tai kevyt polttoöljyä tai bioöljyä
Arvio laitoksen kokonaishyötysuhteesta (brutto)	yli 95 %
Arvio käyttöajasta (/vuosi)	8 000 h/a (huipunkäyttö 7 000 h/a)
Käyttöönottovuosi	2020
Arvio kaukolämmöntuotannosta (/vuosi)	1 250 GWh
Arvio sähköntuotannosta (/vuosi)	450 GWh
Arvio prosessihöyryn tuotannosta (/vuosi)	0–100 GWh

Biovoimalaitoksen monipolttoainekattilan toiminta perustuu leijutekniikkaan, joka mahdollistaa useiden polttoaineiden polttamisen yhtä aikaa. Polttoainejakauma jakautuu biovoimalaitoksen monipolttoainekattilassa pääsääntöisesti kolmeen eri polttoaineeseen, jotka ovat biopolttoaine, turve ja kiinteä kierrätyspolttoaine (SRF). Edellä mainittujen polttoaineiden lisäksi monipolttoainekattilan polttoaineina on mahdollista käyttää toisinaan myös tehtaiden prosessikaasua sekä muita sivutuotteita. Näiden polttoaineiden lisäksi voidaan jatkossa käyttää muitakin polttoaineita, kuten penkkanokea. Taulukossa 1 mainittua raskasta ja/tai kevyttä polttoöljyä tai bioöljyä voidaan käyttää biovoimalaitoksen kattilan käynnistyspolttoaineen lisäksi myös varapolttoaineena. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Monipolttoainekattilan petimateriaalina käytetään hiekkaa, jonka sekaan polttoaineet syötetään. Hiekka kuumentaa kattilaan syötetyt polttoaineet ja saa ne syttymään nopeasti.

Palamisilmaa puhalletaan kattilaan syötettyjen polttoaineiden sekä hiekan seokseen. Palamisilman tarkoituksena on saada hiekka, polttoaine ja polttoaineiden palamisen seurauksena syntynyt tuhka liikkumaan ilman ja savukaasujen mukana. Puhallettavaa palamisilman määrää voidaan säädellä tarpeen mukaan. Kattila on varustettu öljypolttimilla käynnistämisen tai häiriötilanteiden varalta. Sykloneita käytetään erottamaan hiekka, palamaton polttoaine ja karkea tuhka savukaasuvirrasta, jonka jälkeen erotetut aineet palautetaan takaisin tulipesään. Monipolttoainekattilan lämmöntalteenotto-osaan johdetaan savukaasuvirta, josta edellä mainitut aineet on eroteltu. Syöttövesi, joka on pumpattu biovoimalaitoksen kattilaan, höyrystyy lämmöntalteenotto-osassa ja tämän jälkeen höyry tulistetaan. Lämmöntalteenotto-osassa syntyneet savukaasut puhdistetaan sekä lauhdutetaan ennen kuin ne voidaan johtaa savupiipusta ulkoilmaan. Biovoimalaitoksen höyryturbiiniin johdetaan monipolttoainekattilasta tulistettu höyry. Näin höyryturbiiniin johdettu höyry alkaa pyörittämään sekä turbiinia että generaattoria, jotka ovat samalla akselilla. Kyseinen generaattori toimii sähköä tuottajana. Höyryturbiinista höyry on mahdollista johtaa kaukolämmönvaihtimiin tai prosessihöyryksi tehtaalle. Mikäli höyry johdetaan tehtaalle prosessihöyryksi, lauhdutetaan höyry jälleen vedeksi ja syötetään uudelleen kattilaan. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Kiertoleijukattila on varustettu SNCR-ammoniakki järjestelmällä (Selective Non Catalytic NO_x Reduction), jotta vaadittua typpioksidipäästötasoa ei ylitetä. Ammoniakin lisäys perustuu typpioksidin pelkistysreaktioon, jossa ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa muodostaen typpeä ja vettä. Ammoniakki annostellaan ruiskujen avulla suoraan tulipesään tai syklonin sisäänmenokanavaan, joka sijaitsee tulipesän ja syklonin välissä. (Valmet Technologies Oy 2020)

Kiinteän polttoaineen poltossa biovoimalaitoksen kiertoleijukattilassa muodostuu palamisessa sekä pohja- että lentotuhkaa. Näiden lisäksi palamisessa syntyy kattilatuhkaa. On arvioitu, että syntyvän tuhkan määrä vuodessa on biovoimalaitoksella noin 15 000 tonnia tuhkapitoisuuksien ja polttoaineiden käyttömäärien perusteella laskettuna. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

2.3 Laanilan biovoimalaitoksella käytettävät polttoaineet

Polttoaineina biovoimalaitoksella voidaan käyttää biopolttoainetta, turvetta, kiinteää kierrätyspolttoainetta (SRF), kevyttä/raskasta polttoöljyä, bioöljyä ja prosessikaasua sekä penkkanokea. Näistä polttoaineista pääasiassa käytetään turvetta, biopolttoainetta ja kiinteää kierrätyspolttoainetta, joita käydään läpi tarkemmin tässä työssä. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Biovoimalaitokselle tulevat polttoainekuormat punnitaan laitoksen alueella lukuun ottamatta SRF-polttoainetta, joka punnitaan jätteiden lajittelulaitoksella. Polttoaineiden punnituksella varmistetaan, että polttoaineita on riittävästi energiantuotantoa varten. Polttoaineiden vastaanottoasemat on jaettu siten, että turve- ja biopolttoainekuormat puretaan samaan vastaanottoasemaan, kun taas SRF-polttoaineelle on oma vastaanottoasemansa. Vastaanottoasemista polttoaineet kerätään silloihin, biopolttoaine ja turve kerätään kahteen suureen 3 500 m³ siiloon ja SRF-polttoaine kerätään 1 000 m³ siiloon. (Lupapäätös nro 144/2017/1; Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020). Polttoaineet kuljetetaan kuljettimia pitkin seuralle, jossa erotellaan metallit ja murskataan liian isot polttoainejakeet. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Biovoimalaitoksen polttoainejakauma vaihtelee saatavilla olevien polttoainejakeiden sekä käyttötilanteiden mukaisesti. Biovoimalaitoksen kiertoleijukattila on suunniteltu siten, että turpeen osuutta polttoainejakaumassa saadaan vähennettyä. Osa turpeen osuudesta korvataan SRF-polttoaineella ja osa biopolttoaineella. Kiertoleijukattilan polttoainejakaumalle määritellyt kilpiarvot ovat seuraavat: biopolttoainetta 70 %, turvetta 15 % ja kiinteää kierrätyspolttoainetta (SRF) 15 %. Kilpiarvot edustavat Oulun Energian määrittelemää polttoainejakaumaa, jolla kiertoleijukattilan on haluttu toimivan. Monipolttoainekattilassa on kuitenkin mahdollista polttaa sekä biopolttoainetta että turvetta hetkellisesti myös 100 % polttoainejakaumalla. Tällaisessa tilanteessa enimmäismäärä käytetylle biopolttoaineelle eli puulle on noin 91 tonnia tunnissa (t/h). Vastaava enimmäismäärä turpeelle on hieman alhaisempi eli noin 86 t/h. Kiinteän kierrätyspolttoaineen hetkellisen maksimimäärän arvioiminen on haasteellista ja tulokseltaan epävarmaa epäpuhtauksien vuoksi. (Lupapäätös nro 144/2017/1)

2.3.1 Biopolttoaine

Puuperäisellä polttoaineella ja peltobiomassalla tarkoitetaan biopolttoainetta, jota voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitosten polttoaineena. Biomassa soveltuu koostumuksensa vuoksi hyvin polttoaineeksi, sillä se sisältää noin 80 % haihtuvia aineita ja noin 20 % kiinteää hiiltä. Puupolttoaineet, joita biovoimalaitoksella käytetään, ovat metsäpolttoaineita ja sahojen tai muun teollisuuden sivutuotteita. Metsäpolttoaineilla tarkoitetaan erilaisia hakkeita, joita ovat kokopuu- ja rankahake, metsätähdehake sekä kantohake. (Iacovidou et al. 2018) Eri puulajien sekä niiden iän mukaan puun biomassan jakautuminen voi vaihdella hyvinkin paljon runkopuun, oksien, kuoren ja lehtien tai neulasten välillä (Alakangas et al. 2016). Biopolttoaineena käytettäviä teollisuudesta saatavia sivutuotteita ovat kuori, sahanpuru, kutterinlastu, puutähdehake ja puhdas kierrätyspuu. Näiden lisäksi voidaan käyttää myös puupellettiä sekä -brikettiä biopolttoaineena. Biopolttoaineiden tuotantoa varten on mahdollista kasvattaa niin kutsuttuja energiakasveja, joita käytetään vain energiantuotantoon. (Iacovidou et al. 2018)

Laanilan biovoimalaitokselle tuotava biopolttoaine voidaan varastoida laitoksen alueella joko runkoina tai hakkeena. Mikäli biopolttoaine on varastoitu laitoksen alueella runkoina, voidaan se hakettaa mobiilihakkurilla polttoaineterminaalissa. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020) Biovoimalaitokselle hankittava biopolttoaine on peräisin alan toimittajilta, jotka sijaitsevat noin 200 kilometrin säteellä laitoksesta (Lupapäätös nro 144/2017/1).

Puusta saatavaan energiasisältöön vaikuttaa erityisesti polttoaineen kemiallinen koostumus, jolla tarkoitetaan pääasiassa hiilivety-yhdisteisiin sitoutunutta auringon energiaa. Tämän myötä voidaan todeta, että suuremman hiili- ja vetypitoisuuden omaavan polttoaineen energiasisältö on myös suurempi. Alkuainekoostumus vaihtelee vain vähän eri puulajien välillä ja pääsääntöisesti muodostuu vain kolmesta alkuaineesta, jotka ovat hiili, vety ja happi. Edellä mainitut alkuaineet kattavat jopa noin 99 % osuuden puun kuiva-aineen massasta. Loput puun kuiva-aineen massasta jakautuu useammille eri alkuaineille, joiden osuudet voivat olla hyvinkin pieniä. (Alakangas et al. 2016)

Yleisesti biomassalla on korkea kosteuspitoisuus ja alhainen lämpöarvo. Esimerkiksi kivihiileen verrattuna biomassan lämpöarvo on vain hieman yli puolet kivihiilen lämpöarvosta. Lisäksi biomassan hiukkas- ja irtotiheys ovat huomattavasti pienemmät

kuin kivihiilellä. Tämän seurauksena biomassan kokonaistiheys on noin kymmenesosa hiilen tiheydestä, jolloin biomassaa täytyy määrällisesti polttaa enemmän kuin kivihiiltä. Biomassan sisältämät kemialliset ominaisuudet vaihtelevat paljon eri biopolttoaineiden välillä. Yleensä puuperäisillä polttoaineilla kloori-, typpi- ja tuhkapitoisuudet ovat suhteellisen alhaiset. Maataloudesta peräisin olevilla biopolttoaineilla (esimerkiksi olki) kalium- ja klooripitoisuudet voivat olla paljon suuremmat. Vastaavasti myös tuhkapitoisuus vaihtelee biomassan alkuperän mukaan. Puuperäisten polttoaineiden tuhkapitoisuus on pienempi verrattuna maataloudesta peräisin oleviin biopolttoaineisiin. Kuitenkin biopolttoaineiden tuhkapitoisuutta verrattaessa esimerkiksi kivihiileen, on tuhkapitoisuus alhaisempi. Lisäksi myös typpi- ja rikkipitoisuudet ovat huomattavasti pienemmät biopolttoaineilla kuin kivihiilellä. (Iacovidou et al. 2018)

2.3.2 Turve

Turve, jota käytetään biovoimalaitoksella polttoaineena, on pääasiassa jysinturvetta tai palaturvetta. Turve pyritään hankkimaan mahdollisimman läheltä biovoimalaitosta, alan toimittajilta noin 100 kilometrin säteen alueelta (Lupapäätös nro 144/2017/1). Turpeen laadun lisäksi myös kemiallinen koostumus vaihtelee, koska turpeen maatumisaste tai suotyyppi eivät ole vakioita ja lisäksi turpeen tuotantotapa ja sääolosuhteet vaihtelevat. Sääolosuhteet ovat merkittävä tekijä turpeen saatavuuden kannalta. Esimerkiksi kahden peräkkäisen kesän ollessa hyvin sateisia, turpeen tuotanto heikkenee huomattavasti ja kosteuspitoisuuden kasvu huonontaa energiantuotannossa käytettävän turpeen laatua. (Lupapäätös nro 144/2017/1; Gregow et al. 2019; Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Jysinturve on suosituin tapa tuottaa energiaturvetta ja sen osuus onkin yli 90 % energiantuotannossa käytetystä turpeesta. Jysinturpeen tuotantoon kuuluu neljä merkittävintä vaihetta, jotka ovat jysintä, kääntäminen, karheaminen ja kokoaminen. Kokoamisvaihe erottaa erilaiset jysinturpeen tuotantomenetelmät toisistaan. Sääolosuhteet vaikuttavat jysinturpeen tuotantoon huomattavan paljon. Tuotantoprosessiin kuuluu, että jysinnän jälkeen turpeen annetaan kerätä kosteutta muutaman päivän ajan. Sääolosuhteiden ollessa hyvin sateiset, prosessi estyy. (Alakangas et al. 2016; Gregow et al. 2019)

Palaturvetuotannon vaiheet eroavat jysinturvetuotannosta siten, että turpeen jysinnän jälkeen turve työstetään kentällä palamuotoon. Riippuen palaturvetuotantomenetelmästä,

turve voidaan kääntää kuivumisen tehostamiseksi tai turve voidaan karheta puolikuivana. Verrattuna jysinturpeen tuotantoon, palaturvetuotanto ei ole yhtä riippuvainen sääolosuhteista eikä siten heikennä turpeen laatua merkittävästi. Tämä johtuu siitä, että palaturvetta voidaan tuottaa karhekuivausmenetelmän ansiosta, vaikka sääolosuhteet eivät olisi eduksi turvetuotannolle. (Alakangas et al. 2016)

Fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet turpeelle tulee tutkia ennen kuin sitä käytetään energianlähteenä voimalaitoksessa, sillä turpeen laatu ja ominaisuudet voivat vaihdella ja näin vaikuttavat energiantuotantoon merkittävästi. Tärkeimpiä tutkittavia ominaisuuksia ovat turpeen lämpöarvon ja kosteuden lisäksi tiheys ja palakoko, jotka vaikuttavat polttoaineen käsittelyyn. Edellä mainittujen ominaisuuksien takia on hyvin tärkeää kiinnittää huomiota siihen, miten turvetta kuljetetaan, käsitellään ja varastoidaan. Turve tulee olla varastoituna oikeissa olosuhteissa, sillä muuten turpeen laatu voi heikentyä tai epäpuhtauksien määrä voi lisääntyä. Näiden lisäksi ei ole toivottavaa, että turpeen palakoko muuttuu merkittävästi, koska sekin vaikuttaa huomattavasti turpeen palamisominaisuuksiin. Kemiallisilta ominaisuuksiltaan turve reagoi hyvin herkästi ja syttyy todella helposti palamaan. Tästä syystä tulee ottaa huomioon tulipalo- ja pölyräjähdysvaara, kun käytetään turvetta polttoaineena. (Alakangas et al. 2016)

Turve sisältää haihtuvia aineita noin 56–74 %, joka on vähemmän kuin puulla. Tämä on yksi syy siihen, miksi turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suurempi verrattuna puun kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon. Haihtuvien aineiden lisäksi kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat turvelaji, maatumisaste sekä hiili- ja tuhkapitoisuus. Myös hiilipitoisuus on turpeella suurempi kuin puulla, joten tästä syystä turve palaa hitaammin. Lämpöarvon kasvu on suoraan verrannollinen turpeen maatumisasteeseen. Eli mitä suurempi turpeen maatumisaste on, sitä parempi on turpeen lämpöarvo. Korkea maatumisaste ei kuitenkaan ole paras vaihtoehto turpeen laadulle, sillä silloin myös tuhkapitoisuus kasvaa. Tuhkapitoisuuden kasvua ei ole kannattavaa tavoitella, sillä se voi vaikuttaa negatiivisesti lämpöarvoon. Keskimääräisesti turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 19,0–22,0 megajoulea kilossa (MJ/kg). (Alakangas et al. 2016)

2.3.3 Kiinteä kierrätyspolttoaine (SRF)

Kiinteää kierrätyspolttoainetta (Solid Recovered Fuel, SRF) voidaan tuottaa yhdyskuntajätteestä, kaupan ja teollisuuden lajittelemista jätteistä tai rakennusjätteestä. Yleisesti SRF valmistetaan pääasiassa teollisuuden ja/tai kaupan lajittelemasta polttoon

soveltuvasta jätteestä. Jätejakeet, jotka soveltuvat hyödynnettäviksi, on eroteltu pois jo jätteen syntypaikalla. SRF, jota voidaan käyttää energiantuotannossa, sisältää enimmäkseen muovia, paperia, kartonkia, kuitumateriaaleja sekä puuperäisiä sivu- ja jätemateriaaleja. Tuotettu SRF voidaan paalata tai pelletoida tarvittaessa ennen kuljettamista polttolaitokseen. SRF voidaan kuljettaa polttolaitokselle myös irtonaisena ilman erillistä pakkauskäsittelyä. (Iacovidou et al. 2018; Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Hankintasopimuksissa määritellään kierrätyspolttoaineen laatu, jota biovoimalaitokselle voidaan ottaa vastaan. Ennen kuin jätettä voidaan vastaanottaa laitokselle, tulee SRF:n laadun olla tutkittua ja vastattava haluttuja ominaisuuksia. Sen lisäksi, että SRF-poltttoaine on analysoitu polttoainetoimittajan toimesta, myös laitoksella jokaisesta kuormasta otetaan näyte, joka analysoidaan. SRF-poltttoaineen, jota voidaan vastaanottaa biovoimalaitokselle, on vastattava 1. tai 2. luokan SRF-poltttoainetta. Luokitukset perustuvat standardiin SFS-EN 15359. Standardi määrittää SRF-poltttoaineelle yksityiskohtaiset laatuvaatimukset sekä järjestelmällisen tavan luokitella valmistettu SRF-poltttoaine. Standardin määrittämiä laatuluokkia on viisi, jotka pohjautuvat tehollisen lämpöarvon lisäksi kloori- ja elohopeapitoisuuksiin. Standardin perusteena on varmistaa SRF-poltttoaineen laatu sekä minimoida luokittelun monimutkaisuus. SRF-poltttoaineen laatua voidaan parantaa valitsemalla SRF-poltttoaineen tuotantoon vain niitä jätejakeita, jotka soveltuvat ominaisuuksiltaan siihen hyvin. Laitokset, jotka tuottavat kierrätyspoltttoainetta, esikäsittelevät ja murskaavat jakeen haluttuun palakokoon. Tällöin biovoimalaitoksella kierrätyspoltttoaine ei tarvitse jatkokäsittelyä, esimerkiksi murskausta, vaan se voidaan varastoida ja ohjata sieltä suoraan poltettavaksi. (Lupapäätös nro 144/2017/1; Iacovidou et al. 2018; Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Jätteet, joita käytetään kierrätyspoltttoaineiden raaka-aineina ovat peräisin useista eri lähteistä. Tästä syystä kierrätyspoltttoaineiden laatu voi vaihdella paljon. Esimerkiksi kosteus ja lämpöarvo voivat vaihdella poltttoaineen sisältämän muovin määrän perusteella. Kun poltttoaine sisältää enemmän muovia, poltttoaineen kosteus on alhaisempi ja lämpöarvo korkeampi, koska muovien hiili- ja vetypitoisuudet ovat suuria. Poltttoaineen sisältäessä enemmän puuta, poltttoaineen kosteuspitoisuus kasvaa ja lämpöarvo laskee. Keskiarvo kierrätyspoltttoaineen kosteudelle on 20,2 %. Tehollisen lämpöarvon keskimääräinen arvo kierrätyspoltttoaineelle on 17,9 MJ/kg saapumistilassa. (Alakangas et al. 2016; Nasrullah et al. 2017)

Tärkeimmät kierrätyspolttoaineiden laatuun vaikuttavat tekijät ovat palakoko, kosteus, epäpuhtaudet ja tuhkapitoisuus sekä kemiallinen koostumus. Näiden lisäksi myös jätteiden käsittelyllä, kuten lajittelutekniikoilla ja -yksiköillä, on vaikutusta tuotettavan SRF-poltttoaineen laatuun. Kierrätyspoltttoaineen epäpuhtauksilla tarkoitetaan muun muassa metallia ja lasia. Kemiallisessa koostumuksessa laatuun vaikuttavat erityisesti raskasmetallit, klooripitoisuus ja metallinen alumiini. Kemialliselta koostumukseltaan kierrätyspoltttoaineet voivat sisältää enemmän natriumia, kaliumia ja alumiinia verrattuna muihin polttoaineisiin, kuten puuhun ja turpeeseen. Suuret natrium-, kalium- ja alumiinipitoisuudet vaikuttavat kasvattavat kattilan likaantumiseriskiä. Ympäristöpäästöjen ja tuhkan hyötykäytön kannalta kierrätyspoltttoaineen sisältämät raskasmetallit ovat haasteellisia. Metallisen alumiinin aiheuttamat haitat voivat vaikuttaa voimalaitoksen kattilan toimintaan. Vaikka metallisella alumiinilla onkin alhainen sulamispiste (660 °C), niin silti se hapettuu heikosti. Tästä syystä kierrätyspoltttoaineen sisältämä alumiini voi sulaessaan muodostaa ohuen oksidikalvon peittämiä pisaroita. Kohdatessaan kylmemmän pinnan pisarat tarttuvat siihen voimakkaasti. (Alakangas et al. 2016; Nasrullah et al. 2017)

Klooria esiintyy SRF-poltttoaineen raaka-aineista muoveissa ja biomateriaaleissa. Klooria sisältävät muovit ovat pääasiassa PVC-muoveja, joissa klooria esiintyy kloorattuina polymeereinä. Biomateriaalien sisältämä kloori on peräisin maaperästä ja esiintyy pääasiassa mineraalisina yhdisteinä liukoisten kloorien muodossa. Polttoaineiden liian korkea klooripitoisuus aiheuttaa kattilan pintojen syöpymistä sekä lisää HCl-päästöjä ja vaikuttaa heikentävästi määrän rikinpoistoyksikön tehokkuuteen. Edellä mainittujen lisäksi polttoaineiden klooripitoisuuden määrittäminen on oleellista ennustettaessa elohopeapäästöjen määrää, sillä kloori voi reagoida elohopean kanssa muodostaen elohopeaklorideja. On myös mahdollista, että vapautuva kloridi on peräisin tavanomaisen polttoaineen rinnakkaispoltoista. Esimerkiksi poltettaessa bitumihiihtä kloridi voi muodostaa suoloja muun muassa natriumin, kaliumin, kalsiumin kanssa tai orgaanisia klooriyhdisteitä. Kloori voi reagoida polttoaineiden rinnakkaispolton aikana myös aromaattisten orgaanisten yhdisteiden kanssa, jolloin muodostuu haitallisia dioksiineja. Kloridien muodostumista polttoaineiden rinnakkaispolton aikana voidaan vähentää esimerkiksi erilaisilla mineraalilisäaineilla, kuten dolomiitilla, josta on kerrottu tarkemmin tämän työn kappaleessa 3.2.3 Dolomiitin käyttö lisäaineena leijukerrospoltoissa. Myös muiden lisäaineiden, kuten jätevesilietteen, käyttöä on tutkittu kloridipäästöjen vähentämiseksi. (Szydelko et al. 2020)

Palakoko on merkittävä tekijä kaikissa voimalaitoksissa, joissa poltetaan mursketta. Sopiva ja tasalaatuinen palakoko takaa sen, että murskeen syöttö ja palaminen onnistuvat. Yleisellä tasolla kierrätyspolttoaineen nimellinen palakoko on 63 millimetriä (mm) ja maksimi palakoko on 300 mm, jotka soveltuvat voimalaitoksissa käytettäville syöttölaitteille. Käytännön kannalta murskaus tiettyyn palakokoon voi olla myös haasteellista joidenkin muovien, kumien ja tekstiilien kannalta. (Alakangas et al. 2016; Iacovidou et al. 2018)

Oulun Ruskoon on rakennettu jätteiden lajittelulaitos, joka tuottaa kierrätyspolttoainetta. Jätteiden lajittelulaitos on Oulun Energian omistama ja tuottaa pääasiassa Laanilan biovoimalaitokselle kierrätyspolttoainetta. Jätteet, jotka jätteiden lajittelulaitokselle päätyvät, ovat rakennusjätettä, teollisuuden- ja kaupanjätettä. Jätteiden lajittelulaitoksella tuotettavan SRF:n laatua tarkkaillaan näytteenotolla, joka toteutetaan omavalvontaohjelman määrittelemällä tavalla. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020) Kierrätyspolttoaineiden lisäksi jätteiden lajittelulaitokselta saadaan myös muita jätejakeita takaisin hyötykäyttöön, kuten metalleja ja paperia. Rejektit eli jätejakeet, joita ei voida hyödyntää biovoimalaitoksella tai muussa hyötykäyttökohteessa, menevät Laanilan ekovoimalaitokselle polttoon tai loppusijoitukseen jätekeskukseen. (Puisto & Tihinen 2020)

Oulun Energia on arvioinut ja selvittänyt jätteiden lajittelulaitoksen rakentamisen kannattavuutta. Tietoa on kerätty erityisesti kotitalous-, teollisuus- ja rakennusjätteistä, joita alustavasti suunniteltiin käsiteltäväksi jätteiden lajittelulaitoksella. Jätejakeet kerätään Oulun Energian jätteiden lajittelulaitokselle Pohjois-Suomen alueelta. Kotitalousjätteen lähtöaineistoa kerättiin eri jäteyhtiöiltä. Lisäksi lähtöaineistona käytettiin Oulun yliopiston käsinlajittelukokeen tuloksia sekä Päijät-Hämeen Jätehuollon LATE-jätteenlajittelulaitoksella tehtyjä käsinlajittelukokeita. (Lehtomäki & Dahlbom 2017; Dahlbom 2018) Tulokset osoittivat kotitalousjätteen sisältävän pääasiassa muoveja, biojätettä sekä paperia ja kartonkia. Kotitalousjätteiden koostumus vaihteli jonkin verran riippuen jätteen keräyksen sijainnista. Kotitalousjätteen mekaanista lajittelua arvioitiin useiden eri vaihtoehtojen kannalta, mutta mikään vaihtoehto ei osoittautunut kustannuksiltaan kannattavaksi. Suurten kustannusten lisäksi kotitalousjätteen lajitteluprosessi on hyvin haastava toteuttaa siten, että kotitalousjätteestä valmistettavan SRF-polttaineen laatu täyttäisi Laanilan biovoimalaitoksen vaatimukset. Tästä syystä kotitalousjätettä ei sisällytetty Oulun Energian jätteiden lajittelulaitoksen

raaka-aineeksi. Teollisuusjätteistä kootut lähtöaineistot ovat peräisin ELY-keskuksen tiedoista. Tiedot osoittavat, että teollisuudesta peräisin olevat jätteet ovat pääasiassa puupohjaista jätettä ja seka-/energiajätettä. Tiedot rakennusjätteistä kerättiin kahdesta rakennusyhtiöstä ja lisäksi aineistona hyödynnettiin Kiertokaaren LARE-lajitteluareenan jätedataa. Tiedot osoittivat, että myös rakennusjäte sisälsi analyysien perusteella pääasiassa puupohjaista jätettä ja sekajätettä sekä lisäksi betonijätettä. (Lehtomäki & Dahlbom 2017; Dahlbom 2018)

Jätteiden lajittelulaitokselle tuleva jäte esilajitellaan karkeasti konetyöllä ennen syöttämistä kuljettimelle, joka kuljettaa materiaalin murskaimelle. Jäte kulkee laitoksella kuljettimia pitkin eri erotusmenetelmien läpi, jotta eri materiaaleja saadaan eroteltua mahdollisimman paljon hyödynnettäväksi. Ensimmäiseksi materiaalivirrasta erotellaan pois pitkät kappaleet sekä magneettiset metallit. Tämän jälkeen tulevat erotusmenetelmät ovat rumpu- ja tasoseula. Tasoseula jakaa materiaalivirran kolmeen eri palakokoon, jonka jälkeen eri palakoot kulkevat kuljettimia pitkin seuraavien erotusmenetelmien läpi: magneettinen erotus, pyörrevirtaerotus, tuuliseula ja NIR (Near Infrared sensor for sorting) eli optinen lajittelulaite. Edellä mainittujen erotusmenetelmien avulla materiaalivirrasta saadaan erotettua magneettiset ja ei-magneettiset metallit, hienoaines, PVC-muovit (polyvinyylikloridi), kuidut, rejektit ja energiahyödynnettävät jakeet sekä kierrätettävät materiaalit. Energiana hyödynnettävät jakeet kuljetetaan Laanilan ekovoimalaitokselle polttoon. Näiden lisäksi saadaan kiinteää kierrätyspolttoainetta (SRF), joka murskataan vielä uudestaan ennen varastointia tai paalausta. (Bezner 2020)

3 TUHKA ENERGiantuotannossa

3.2 Tuhkan muodostuminen ja koostumus

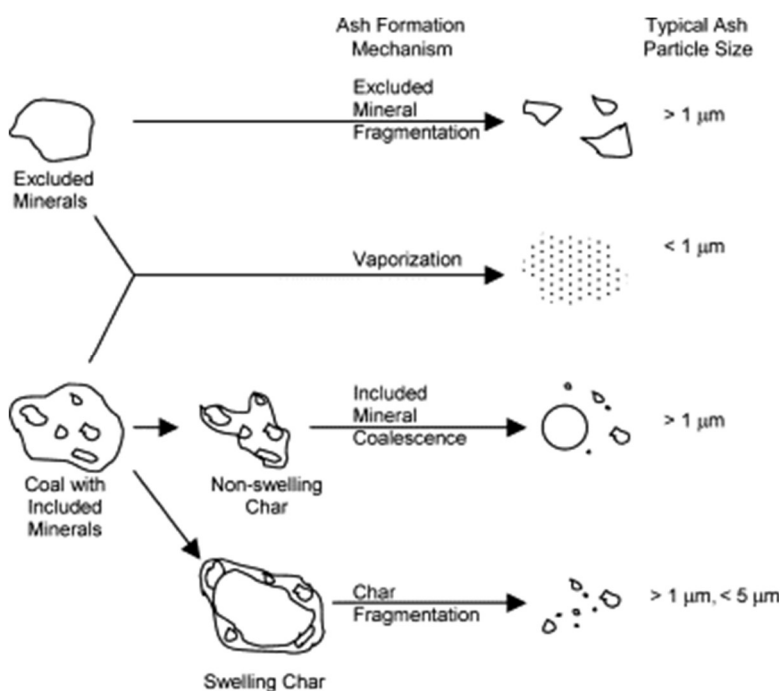
Polttoaineet sisältävät epäorgaanisia ainesosia, joiden palamattomista jäännöksistä tuhka muodostuu. Polttoaineiden tuhkaa muodostavat epäorgaaniset ainesosat vaihtelevat huomattavasti eri polttoaineiden välillä niin koostumukseltaan kuin määrältään. Esimerkiksi puun runko sisältää vain noin prosentin kymmenesosan tuhkaa muodostavia epäorgaanisia ainesosia. Puolestaan turve ja kierrätyspolttoaine sisältävät epäorgaanisia ainesosia moninkertaiset määrät. (Ranta & Wahlström 2002; Ojala 2010)

Tuhkan muodostumiseen vaaditaan sekä fysikaalisia että kemiallisia reaktioita, jotka tapahtuvat toistensa jälkeen. Fysikaaliset ja kemialliset reaktiot vaihtelevat riippuen polttotekniikasta ja voimalaitoksessa käytettävistä polttoaineista. Prosessiketju, jossa tuhkaa muodostuu, koostuu pääpiirteittäin polttoaineen syötöstä, tuhkaa muodostavien ainesosien vapautumisesta ja muuntumisesta sekä tuhkan erotuksesta savukaasuista. Muodostuvan tuhkan laatuun ja tyyppiin voidaan vaikuttaa useilla eri tavoilla, joita ovat esimerkiksi polttoaineen koostumuksen ja karkeuden lisäksi voimalaitoksella käytettävän polttolaitteiston tyyppi sekä polttolämpötila. Myös voimalaitoksella syntyneen tuhkan laatuun on mahdollista vaikuttaa jo voimalaitoksella muun muassa tuhkan varastointitavalla sekä varmistamalla, että eri tuhkalaadut kerätään ja pidetään erillään toisistaan. Yleisesti tuhkan happamuusaste vaihtelee 10–13 pH -yksikön välillä, joten tuhka on emäksistä. (Ojala 2010) Edellä mainittujen lisäksi tuhkan laatuun vaikuttaa käytettävän kierrätyspolttoaineen laatu sekä osuus käytettävien polttoaineiden kokonaismäärästä. Myös erotustekniikka, jota käytetään muodostuvien tuhkien ja pölyn erotukseen, vaikuttaa tuhkan laatuun. (Ranta & Wahlström 2002)

Enimmäkseen puun tuhka sisältää alkali- ja maa-alkalimetalleja. Puun tuhka sisältääkin pääasiassa kalsiumia, magnesiumia ja kaliumia. Tärkeimpiä puun tuhkan sisältämiä ravinteita ovat fosfori, kalium ja hivenravinteet. Näiden lisäksi puun tuhkassa on myös paljon magnesiumia ja kalsiumia, mutta niiden merkitys ravinteiden kannalta ei ole huomattava. Turpeiden tuhkat sisältävät pääasiassa piitä, alumiinia ja rautaa. (Ojala 2010) Kierrätyspolttoaineen (SRF) tuhkan sisältämät ainesosat ovat pääasiassa raskasmetalleja, kuten arseenia, elohopeaa ja lyijyä. (Ranta & Wahlström 2002)

3.2.1 Tuhkan muodostumismekanismit

Suurin osa tuhkasta muodostuu neljän eri mekanismin avulla, jotka on esitetty alla olevassa kuvassa 1. Vaikka periaatekuvassa on esitelty kivihiilen palamisessa syntyviä tuhkan muodostumismekanismeja, voidaan kuvaa silti hyödyntää myös muiden polttoaineiden palamiseen. Yleisesti polttoaineet sisältävät epäorgaanisia ainesosia tai mineraaleja, joista tuhka muodostuu, kuten tämän työn kappaleessa 3.2 (Tuhkan muodostuminen ja koostumus) on kerrottu. Neljä yleisintä tuhkan muodostumismekanismia ovat 1) ulkoisen mineraaliaineksen pilkkoutuminen, 2) epäorgaanisen aineen höyrystyminen ja kondensoituminen, 3) sisäisen mineraaliaineksen yhdistyminen ja 4) hiilen pilkkoutuminen. Biopolttoaineen ulkoisella mineraaliaineksella tarkoitetaan yleensä maaperän mineraaleja, kuten hiekkaa tai savea. Biopolttoaineen sisäisellä mineraaliaineksella voidaan tarkoittaa esimerkiksi piitä (Si), joka on orgaanisesti sitoutunut biomassaan. (Buhre et al. 2006; Zevenhoven et al. 2010)



Kuva 1. Periaatekuva tuhkan muodostumismekanismeista poltettaessa jauhattua hiiltä (Buhre et al. 2006) (Kuva julkaistaan Elsevierin luvalla).

Polttoaineen ulkoisen mineraaliaineksen pilkkoutumiseen ja tuhkapartikkelien kokoon vaikuttavat tekijät ovat mineraalien määrä sekä niiden koko ja tyyppi. Tällöin muodostuvien tuhkapartikkelien koko on yleensä yli $1 \mu\text{m}$. Epäorgaanisten ainesosien höyrystymiseen polton aikana vaikuttaa lämpötila polttoainepartikkelin sisällä sekä polttoainepartikkelin sisältämät helposti höyrystyvät ainesosat, kuten rikki, alkalit ja fosfori. Myös mineraalien koko vaikuttaa tähän tuhkan muodostumismekanismiin ja

tällöin muodostuvien tuhkapartikkelien koko on alle 1 μm . Polttoaineen sisäisten mineraaliainesten yhdistymiseen vaikuttavat vastaavat tekijät kuin polttoaineen ulkoisten mineraaliainesten pilkkoutumiseen eli mineraalien koko, tyyppi ja jakautuminen. Tällöin myös muodostuvien tuhkapartikkelien kokoluokka on sama eli yli 1 μm . Polttoainepartikkelien korkeat sisäiset lämpötilat aiheuttavat mineraalien muuttumisen viskoosiksi ja mineraalien yhdistymisen. Hiilen pilkkoutumiseen vaikuttaa erityisesti polttoaineen laajentuminen palamisen aikana. Tapauksessa, jossa polttoainepalaset ovat suuria ja sisältävät suuria mineraaleja, muodostuu suuria tuhkahiukkasia polttoaineen sisältämien mineraalien yhdistyessä. Mikäli polttoaine laajenee voimakkaasti palamisen aikana, hiili pilkkoutuu pieniksi palasiksi, jolloin syntyy myös pieniä tuhkapartikkeleita. (Buhre et al. 2006)

3.2.2 Polttoaineiden tuhkapitoisuudet

Puun tuhkapitoisuus vaihtelee eri puulajien sekä niiden iän mukaisesti. Tämän lisäksi tuhkapitoisuuteen vaikuttaa se mistä biomassassa koostuu, eli esimerkiksi onko kyseessä kuoreton vai kuorellinen runkopuu. Yleensä kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on suhteellisen alhainen, vain 0,3–0,7 painoprosenttia (p-%). Iän mukaan tarkasteltuna puun tuhkapitoisuus on alhaisempi vanhemmalla puulla kuin nuorella puulla. Myös kasvupaikka vaikuttaa jonkin verran puun tuhkapitoisuuteen ja voidaan todeta, että pohjoisella havumetsällä tuhkapitoisuus on alhainen. Tuhkapitoisuuden keskiarvolukemat Suomessa kasvaville neljälle eri puulajille (mänty, kuusi, koivu, haapa) ovat runkopuulle 0,46 p-%, kuorelle 2,97 p-%, kuorellisille oksille 1,52 p-% ja 4,97 p-% lehdille. Verrattuna muihin kiinteisiin polttoaineisiin, on puun tuhkapitoisuus alhaisempi, jonka takia tuhkan käsittely on helpompaa ja siten laskee tuhkan käsittelykustannuksia. (Alakangas et al. 2016)

Turpeen tuhkapitoisuuteen vaikuttaa epäorgaanisten kivennäisaineiden, tulvakerrostumien ja kemiallisten saostumien yhteismäärä. Lisäksi maatuneisuusaste vaikuttaa suoraan verrannollisesti turpeen tuhkapitoisuuteen. Eli mitä korkeampi on turpeen maatuneisuusaste, sitä suurempi on myös turpeen tuhkapitoisuus. Yleisesti turpeen tuhkapitoisuus Suomessa on 3–10 p-%. (Alakangas et al. 2016)

Kiinteillä kierrätyspolttoaineilla (SRF) tuhkapitoisuus voi vaihdella 5–15 p-% välillä. Polttoprosessissa syntyvään tuhkan määrään voi vaikuttaa kierrätyspolttoaineen tuhkan palamattomien ainesosien määrä, tuhkapitoisuus sekä kosteuspitoisuus. Kierrätys-

polttoaineella palamattomien ainesosien määrä voi olla suhteellisen pieni, alle 5 p-%, mikäli käytössä oleva polttotekniikka on hyvä. (Ranta & Wahlström 2002)

3.2.3 Dolomiitin käyttö lisäaineena leijukerrospoltoissa

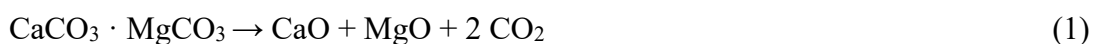
Dolomiitti ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) on karbonaattikiveä, joka muodostuu kalsium-magnesiumkarbonaatista. Kalkkikivi on läheistä sukua dolomiitille, sillä dolomiitin muodostuminen tapahtuu kalkkikiven altistuessa dolomiittituumiselle. Dolomiittituumisella tarkoitetaan prosessia, jonka aikana kalsiumionit muuttuvat magnesiumioneiksi. Dolomiittia esiintyy kallioperässä sekä kiteinä että sedimentteinä. (SMA Mineral Oy 2020)

Polttoaineiden palamisen seurauksena kattilassa muodostuu rikkioksideja. Kalsiumyhdisteitä, kuten esimerkiksi dolomiittia, voidaan käyttää yhtenä rikinpoistomenetelmänä, sillä kalsiumyhdisteet sitovat rikkioksideja. Kun syntyneistä savukaasuista halutaan poistaa rikin oksideja, voidaan käyttää joko märkää-, puolikuivaa- tai kuivaa puhdistusmenetelmää. Rikin oksidien sitomiseen käytettyä kuivaa menetelmää tarkastellaan tässä tapauksessa tarkemmin, sillä se soveltuu erityisesti leijukerrospoltoon. Kuivamenetelmää käytettäessä kalsiumyhdiste syötetään suoraan tulipesään hienojakoisina hiukkasina poltettaessa kiinteitä polttoaineita. Tällöin kattilaan syötettyjen hiukkasten kalsiumyhdisteet reagoivat palamisen seurauksena syntyneiden rikkioksidien kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia. Tämän myötä leijukerrospoltoissa rikkioksideja sitovien kalsiumyhdisteiden syöttö sekä poisto on yksinkertaista. Kuivamenetelmän avulla saadaan reaktiotuotteena kuivaa kalsiumsulfaattia. Saavutettava rikinpoistoaste käytettäessä leijukerrospoltoa voi olla hyvinkin korkea, sillä kalsiumyhdiste sekoittuu kattilassa hyvin ja siten tehostaa rikin sidontaa. (Deng et al. 2019)

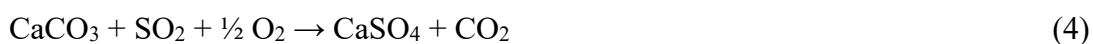
Leijukerrokseen syötetään dolomiittia eli kalsiumyhdistettä, joka reagoi lämpötilan vaikutuksesta rikkioksidin kanssa. Leijukerros pidetään polttoprosessille optimaalisena syöttämällä tuoretta dolomiittia sekä poistamalla jo reagoinutta leijutusmateriaalia. Kalsiumyhdistettä voidaan tarvittaessa lisätä kattilaan ylimäärin ilman, että se tuottaa kattilassa reaktioon liittyviä haasteita. Kuitenkin ihanteellinen tilanne on, että kattilaan syötetyn kalsiumin määrä pidettäisiin reaktioille optimaalisena, vaikka kalsiumyhdiste yleisesti onkin suhteellisen edullista. Liiallisen kalsiumyhdisteen syöttö kattilaan voi nostaa kustannuksia, sillä kalsiumyhdistettä kuluu ylimäärin ja tuhkaa muodostuu nopeammin. Syötetty kalsiumyhdiste on hiukkaskooltaan hyvin pientä, koska silloin

reaktiot tapahtuvat nopeasti. Mikäli kalsiumyhdisteen hiukkaskoko kasvaa kaksinkertaisesti, esimerkiksi 25 mikrometrinä (μm) 50 μm :iin, niin silloin reaktionopeus hidastuu samassa suhteessa. Keskimäärin käytetyn kalsiumyhdisteen hiukkaskoko on 40 μm . (Raiko et al. 1995; Leckner 1998; Deng et al. 2019)

Kalsiumyhdisteen reagoidessa rikin oksidien kanssa, muodostuu kalsiumsulfaattia (CaSO_4), joka voidaan poistaa hiukkaserottimien avulla savukaasuista. Tapahtuvat kemialliset reaktiot, kun rikinpoistossa käytetään dolomiittia ovat seuraavat:



Kalsiumkarbonaatti hajoaa lämpötilan vaikutuksesta ja kalsinoituu, jolloin muodostuu kalsiumoksidia (1). Muodostunut kalsiumoksidi on todella huokoista ja sen ominaispinta-ala on suuri. On kuitenkin todettu, että kalsiumoksidin rakenne muuttuu, kun hiukkaset sintraantuvat lämpötilan vaikutuksesta. Sintraantuminen aiheuttaa hiukkasten ominaispinta-alan pienenemistä sekä vähentää huokoisuutta ja kasvattaa raekokoa. Myös magnesiumkarbonaatti kalsinoituu poltossa magnesiumoksidiksi, mutta se ei kuitenkaan itsessään sido rikkioksideja. Reaktiossa 1 muodostuneeseen kalsiumoksidiin sitoutuu sekä SO_2 että SO_3 (2–3), eli tapahtuu sulfatointireaktio. Sulfatoituminen alentaa sintraantumisen lisäksi myös materiaalin huokoisuutta. Edellä kuvatut reaktiot tapahtuvat normaalissa ilmanpaineessa. Mikäli poltto tapahtuu paineistetussa olosuhteessa, niin tällöin kalsiumyhdiste ei kalsinoidu, vaan sulfatoituu suoraan ilman välivaihetta, seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Rikinsidontakyky vaihtelee erilaisten kalkkikivi- ja dolomiittimateriaalien välillä. Lisäksi rikinpoistotehokkuuteen vaikuttaa muun muassa käytettävän sorbentin kiteisyys, huokoisuus, jauhautuvuus, reaktiivisuus ja epäpuhtaudet. Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat rikin sidontaan leijukerros-poltossa ovat palamisolosuhteet, kuten viipymäaika, lämpötila ja paine sekä käytettävät polttoaineet. Lämpötilalla on suuri merkitys kaikkien edellä mainittujen reaktioiden nopeuksiin. Optimaalinen lämpötila

rikinpoistolle käytettäessä leijukerros polttoa on 850 °C. Mikäli lämpötilaa nostettaisiin huomattavasti rikkioksidien sitomiselle määritetystä optimaalisesta lämpötilasta, sintraantuminen kasvaisi alentaen rikinpoiston tehokkuutta. Tästä syystä lämpötila pyritään pitämään suhteellisen alhaisena. Leijukerros poltossa lämpötila voidaan pitää suhteellisen alhaisena tai lähellä optimaalista lämpötilaa rikkioksidien sitomiselle, jolloin myös sintraantuminen vähenee. Yleisesti kalsiumyhdisteiden viipymäajat ovat pitkiä, luokkaa tunteja tai vuorokausia. Käytettäessä leijukerros polttoa myös savukaasujen viipymäaika on pidempi. Nämä vaikutukset yhdessä edistävät leijukerros poltossa rikinpoiston tehokkuutta ja mahdollistavat jopa yli 95 % rikinpoiston. (Raiko et al. 1995; Leckner 1998; Deng et al. 2019)

4 TUHKATUOTTEET LAANILAN BIOVOIMALAITOKSELLA

Laanilan biovoimalaitoksella leijukerros poltossa syntyviä tuhkatuotteita ovat pohjatuhka (petihiekka), kattilatuhka ja lentotuhka. Syntyvät tuhkatuotteet kerätään erillisiin tuhkasiiloihin tai umpinaisiin säiliöihin, joista tuhkat puretaan ja viedään joko hyötykäyttöön, jatkokäsittelyyn tai Miehonsuon tuhkaläjitysalueelle. Biovoimalaitoksella syntyvästä tuhkamäärästä on tehty arvio polttoaineiden käyttömäärien ja tuhkapitoisuuksien perusteella. Arvio muodostuvan tuhkan määrälle on noin 15 000 tonnia vuodessa (t/a). Muodostuvien tuhkatuotteiden jakauma on esitetty alla olevassa taulukossa 2. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

Taulukko 2. Arvio Laanilan biovoimalaitoksella syntyvien tuhkien määristä (mukaillen Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020).

Tuhkatuote	Jätelaji ¹⁾	Määrä (t/a)
Kattilatuhka	10 01 01, 10 01 15	11 000
Pohjatuhka (petihiekka)	10 01 01, 10 01 15, 10 01 24	2 000 ²⁾
Lentotuhka	10 01 03, 10 01 17 / 10 01 16*	2 000

¹⁾ Jätelajit määritelty jätteistä annetun valtioneuvoston asetuksen (VNa 179/2012) liitteessä 4 (Jäteluettelo: yleisimmät jätteet sekä vaaralliset jätteet) seuraavalla tavalla:

- 10 01 01 pohjatuhka, kuona ja kattilatuhka (lukuun ottamatta nimikkeessä 10 01 04 mainittua kattilatuhkaa)
- 10 01 03 turpeen ja käsittelemättömän puun poltossa syntyvä lentotuhka
- 10 01 15 muu kuin nimikkeessä 10 01 14 mainittu rinnakkaispoltossa syntyvä pohjatuhka, kuona ja kattilatuhka
- 10 01 16* rinnakkaispoltossa syntyvä lentotuhka, joka sisältää vaarallisia aineita
- 10 01 17 muu kuin nimikkeessä 10 01 16 mainittu rinnakkaispoltossa syntyvä lentotuhka
- 10 01 24 leijupetihiekka

²⁾ Pohjatuhkan on arvioitu koostuvan pääasiassa poistettavasta petihiekasta, lisähiekan arvioitu määrä petiin on 5 tonnia vuorokaudessa (t/vrk).

Biovoimalaitoksella muodostuneet tuhkat analysoidaan ympäristöluvan mukaisesti ja mikäli tuhkat tai osa tuhkatuotteista osoittautuvat hyötykäyttökelpoisiksi, voidaan ne luokitella sivutuotteiksi. Kemiallisten analyysitulosten perusteella tuhkatuotteiden tulee kuitenkin täyttää laatuvaatimukset, jotka on määritelty MARA-asetuksessa (843/2017) sekä lannoiteasetuksessa (MMMa 24/11). Myös valtioneuvoston asetus (VNa 179/2012) jätteiden hyödyntämisestä tulee huomioda tuhkatuotteiden kemiallisia analyysijä toteutettaessa, sillä SRF-polttoainetta poltettaessa voimalaitoksella muodostuva tuhka luokitellaan jätteeksi. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020)

4.2 Pohjatuhka

Laanilan biovoimalaitoksen pohjatuhka (Kuva 2) poistetaan kiertoleijukattilan alaosasta ja sykloneista. Pohjatuhka sisältää myös kattilassa olevaa petihiekkaa ja sitä kerätään kattilasta pääasiassa petihiekan määrää säädeltäessä. Petihiekkana biovoimalaitoksella käytetään pääasiassa kvartsia eli piioksidia. Pohjatuhkajärjestelmä varmistaa kattilan leijukerroksen leijutuskelpoisuuden poistamalla tulipesän pohjalle kerääntyvää leijumatonta materiaalia. Pohjatuhkan epäpuhtaudet koostuvat kemiallisesti inerteistä hiukkasista. Nämä hiukkaset joutuvat pohjatuhkaan biomassan seospolton seurauksena, kun osa näistä hiukkasista kiinnittyy tulipesässä petimateriaaliin. Tulipesästä poistettu pohjatuhka jäähdytetään jäähdytysruuveissa, jotka on kytketty suljettuun jäähdytysvesipiiriin. Jäähdytysruuveista pohjatuhka kulkeutuu kuivana pohjatuhkalle tarkoitettuihin kontteihin, joihin pohjatuhka kerätään ennen kuljettamista hyötykäyttöön tai tuhkan läjitysalueelle. (Lupapäätös nro 144/2017/1; Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020; Valmet Technologies Oy 2020)



Kuva 2. Laanilan biovoimalaitoksen pohjatuhkaa.

4.3 Kattilatuhka

Kattilatuhka (Kuva 3) erotetaan kiertoleijukattilassa muodostuvasta savukaasusta 1-kenttäisellä sähkösuodattimella, joka erottaa kattilatuhkan savukaasusta korkeajännitteen

avulla. Sähkösuodattimen muodostama sähkökenttä koostuu kahdesta järjestelmästä, jotka ovat emissiojärjestelmä ja erotusjärjestelmä. (Valmet Technologies Oy 2020)

Sähkösuodatinta on yleisesti käytetty leijukerroskattiloissa keräämään epäpuhtauksia suodattimeen muodostuvan sähkökentän avulla. Sähkösuodattimien käyttö on kannattavaa, sillä ne ovat suhteellisen edullisia ja niiden tehokkuus on todella hyvä, yleensä yli 99 %. Tavallisesti sähkösuodattimissa on kahdesta kolmeen yksikköä, jotka takaavat korkean suodatustehokkuuden. Kooltaan suurimmat hiukkaset suodattuvat sähkösuodattimen ensimmäisessä yksikössä ja suodatettujen hiukkasten koko pienenee, kun edetään seuraaviin yksikköihin. Aikaisemmissa tutkimuksissa on myös todettu, että hiukkasten lisäksi sähkösuodattimen avulla saadaan poistettua myös osa tuhkassa olevista raskasmetalleista. (Ohenoja et al. 2017)



Kuva 3. Laanilan biovoimalaitoksen kattilatuhkaa.

4.4 Lentotuhka

Lentotuhka (Kuva 4) puolestaan kerätään kalsiumyhdisteen ja aktiivihiilen lisäyksen jälkeen pussisuodattimella. Kiertoleijukattilassa muodostuneet savukaasut johdetaan sähkösuodattimen jälkeen pussisuodattimelle, jossa savukaasuista poistetaan lentotuhkan lisäksi myös muita hiukkasia. Kalsiumyhdisteen lisäyksellä pyritään vähentämään happamien savukaasujen, kuten SO_2 , HCl ja HF muodostumista. Aktiivihiilen lisäyksellä pyritään poistamaan savukaasuista raskasmetalleja, dioksiineja ja furaaneja. (Pöyry Finland Oy 2019, päivittänyt Latola 2020; Valmet Technologies Oy 2020)

On olemassa erilaisia pussisuodatintyyppejä, kuten avoimia ja suljettuja pussisuodattimia, joista valitaan tiettyyn käyttötarkoitukseen soveltuvin. Toimintaperiaate kaikilla pussisuodattimilla on kuitenkin sama. Ilma virtaa pussisuodattimen läpi, jolloin ilman sisältämät epäpuhtaudet, kuten hiukkaset ja dioksiinit, jäävät pussisuodattimeen eivätkä läpäise suodatinta. Aktiivihiiilen lisäyksen avulla saadaan tehostettua pussisuodattimen toimintaa ja epäpuhtauksien suodatustehokkuutta. Aktiivihiihi lisätään reaktoriin ennen pussisuodatinta. Aktiivihiiilen käyttöä sorbenttina suositetaan, koska sen hankintahinta on edullinen, fysikaaliskemialliset ominaisuudet ovat stabiilit, ominaispinta-ala on suuri ja sen adsorptiokapasiteetti on erinomainen. (Ivell 2012; Ma et al. 2020)



Kuva 4. Laanilan biovoimalaitoksen lentotuhkaa.

5 TUHKIEN HYÖDYNTÄMISLAINSÄÄDÄNTÖ

Kun voimalaitoksella syntyviä tuhkia pyritään ottamaan hyötykäyttöön, lainsäädäntö, joka tulee huomioida, on laaja. Lainsäädäntö määrittelee voimalaitoksella syntyvän tuhkan jätteeksi sekä asettaa raja-arvot tuhkien haitallisuudelle ympäristölle. Tuhkan tuottajaa velvoitetaan minimoimaan tuhkan haitallisuus ja kierrättämään syntyvä tuhka sen sijaan, että syntyvä tuhka loppusijoitettaisiin. Seuraavaksi käydään läpi lainsäädäntöä, joka koskee voimalaitoksessa syntyvien tuhkien hyötykäyttöä.

5.2 Ympäristönsuojelulaki 527/27.6.2014

Ympäristönsuojelulain (YSL, 527/27.6.2014) tarkoituksena on edistää ympäristön kestävyyttä monin eri tavoin. Ympäristönsuojelulaki on määritetty ehkäisemään ympäristön pilaantumista ja luonnonvarojen ylikuluttamista sekä päästöjen syntymistä. Näiden lisäksi ympäristönsuojelulain avulla pyritään torjumaan mahdollisia ympäristövahinkoja sekä vähentämään syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta. (YSL 527/27.6.2014)

Ympäristönsuojelulaki on otettava huomioon kaikessa toiminnassa, joka voi aiheuttaa tai jonka toimesta voi aiheutua ympäristön pilaantumista, mukaan lukien jätteen syntyminen. Toiminnanharjoittajan tulee olla tietoinen vaikutuksista ja riskeistä, joita toiminta voi aiheuttaa ympäristölle. Tämän lisäksi toiminnanharjoittajan tulee olla tietoinen, kuinka edellä mainittuja riskejä ja vaikutuksia voidaan hallita ja minimoida. (YSL 527/27.6.2014)

Laanilan biovoimalaitos on jätteen rinnakkaispolttolaitos, joten toiminta on luvanvaraista ympäristönsuojelulain liitteen 1 (Luvanvaraiset toiminnot) taulukon 1 kohdan 13 mukaan. Tämän lisäksi ympäristölupaa velvoitetaan ympäristöluvan liitteen 1 taulukon 1 kohdassa 3 energiantuotantolaitoksilta, joiden polttoaineteho on suurempi tai yhtä suuri kuin 50 MW. Ympäristöluvan 32 §:n mukaan on olemassa myös poikkeus, että liitteen 1 taulukossa 2 mainittuun kohtaan 13 jätteen ammattimaiseen tai laitospäiseen käsittelyyn ei vaadita ympäristölupaa, mikäli kyseessä on haitattomaksi käsitellyn tuhkan hyödyntäminen ja käyttö lannoitevalmistelain (L 539/29.6.2006) mukaisesti. (YSL 527/27.6.2014)

5.3 Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017

Valtioneuvoston asetuksen (VNa 843/2017) eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (jäljempänä MARA-asetus) perusteena on huomioida erityisesti niiden jätteiden hyödyntäminen maarakentamisessa, jotka eivät tarvitse Ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa. MARA-asetus määrittelee edellytykset, joiden perusteella jätettä voidaan hyötykäyttää maarakentamisessa. (VNa 843/2017)

MARA-asetuksen liitteessä 1 (Asetuksen soveltamisalaan kuuluvat jätteet ja niiden käyttökohteet) on määritelty, että turpeen ja puun poltossa syntyvät tuhkat (lentotuhkat, pohjatuhkat ja leijupetihiekka) soveltuvat hyötykäyttöön maarakentamisessa. Samassa liitteessä esitetään, että käsiteltyä jätteenpolton kuonaa on mahdollista hyötykäyttää esimerkiksi väylä- ja kenttärakenteiden lisäksi myös teollisuus- tai varastorakennusten pohjarakenteissa. (VNa 843/2017)

MARA-asetuksen liitteessä 2 (Haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerrospaksuus maarakentamiskohteessa) määritetään taulukkomuodossa raja-arvot, jotka hyödynnettävien jätteiden tulee täyttää. MARA-asetuksessa määritetyt raja-arvot ovat tämän työn Liitteenä 1. (VNa 843/2017)

5.4 Lannoitevalmistelaki 539/29.6.2006

Lannoitevalmistelain (L 539/29.6.2006) avulla on tarkoitus edistää lannoitevalmisteiden tarjontaa ja varmistaa, että käytettävissä olevat lannoitevalmisteet ovat turvallisia ja hyvälaatuisia sekä erityisesti kasvintuotantoon sopivia. Lisäksi lannoitevalmistelaki varmistaa, että lannoitevalmisteista on saatavilla tarpeelliset tiedot sekä ostajille että käyttäjille. Lannoitevalmistelaki koskee niitä toiminnanharjoittajia, jotka valmistavat lannoitevalmisteita tai niiden raaka-aineita sekä ovat tekemisissä lannoitevalmisteiden kanssa, joko käyttäen, kuljettaen, maahantuonnin/maastaviennin tai markkinoille saatamisessa. (L 539/29.6.2006)

Lannoitevalmistelaki määrittää sen, että lannoitevalmisteiden on vastattava käyttötarkoitustaan sekä oltava turvallisia ja tasalaatuisia. Lannoitevalmisteen käytöstä tai sen sisällöstä ei saa aiheutua terveyteen tai turvallisuuteen kohdistuvaa haittaa tai vaaraa

ympäristölle, eläimille tai ihmisille. Kaikkien lannoitevalmisteiden tulee täyttää niille asetetut laatuvaatimukset. (L 539/29.6.2006)

5.5 Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 24/11

Maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa (MMM 24/11) lannoitevalmisteista säädetään laajasti kaikesta lannoitevalmisteisiin ja niiden kuljettamiseen, varastointiin ja käyttöön liittyvistä seikoista. Tässä asetuksessa myös määritetään vaatimukset muun muassa lannoitevalmisteiden laatuun, merkintöihin sekä pakkauksiin ja raaka-aineisiin. Ainoastaan ne lannoitevalmisteet, joita käytetään kaatopaikkojen tai muiden suljettujen alueiden maisemointiin, eivät lukeudu tämän asetuksen sisältöön. (MMM 24/11)

Lannoitevalmistelaissa (L 539/29.6.2006) lannoitevalmisteet luokitellaan eri tyypeihin, jotka maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa (MMM 24/11) lannoitevalmisteista jaetaan vielä kansallisiin tyyppinimiryhmiin. Eri tyyppinimiryhmien määrittämisen apuna hyödynnetään asetuksen liitteen 1 asettamia vaatimuksia sekä asetuksen liitteen 2 asettamia sivu- ja hivenravinteiden vähimmäispitoisuuksia, jotka voivat esiintyä eri lannoitevalmisteissa. (MMM 24/11)

Lannoitevalmisteita koskevan asetuksen perusteella tuhkalannoitteena tai tuhkalannoitteen raaka-aineena voidaan käyttää muun muassa turpeen, peltobiomassan ja puun tuhkaa. Tuhkaa tulee asetuksen mukaan käsitellä siten, että tuhkan pölyäminen estetään mahdollisimman hyvin. Asetus lannoitevalmisteista määrittää sen, että poltettaessa esimerkiksi puuta ja turvetta, syntyvistä savukaasuista erotettua tuhkaa voidaan hyödyntää lannoitekäyttöön. (MMM 24/11)

Lannoitevalmisteita koskevassa asetuksessa on määritetty haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet sekä pelto- että metsälannoitukseen. Taulukossa 3 on esitetty asetuksessa ilmoitetut enimmäispitoisuudet, jotka on määritetty kuiva-ainekilogrammaa kohden. Tämän lisäksi lannoitevalmisteiden asetuksessa määritetään erikseen myös tiettyjen alkuaineiden enimmäispitoisuuksia, jotka voivat vaikuttaa Taulukossa 3 esitettyihin enimmäispitoisuuksiin. (MMM 24/11)

Taulukko 3. Maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista liitteen 4A (Lannoitevalmisteiden haitalliset aineet, eliöt ja epäpuhtaudet; A. Haitalliset aineet) mukaiset haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet pelto- ja metsälannoitevalmisteissa (mukaillen MMMa 24/11).

Alkuaine	Peltolannoitteet enimmäispitoisuus mg/kg kuiva-ainetta	Metsälannoitteet enimmäispitoisuus mg/kg kuiva-ainetta
Arseeni (As)	25	40
Elohopea (Hg) ¹⁾	1,0	1,0
Kadmium (Cd)	1,5 ²⁾	25
Kromi (Cr)	300 ³⁾	300
Kupari (Cu)	600	700
Lyijy (Pb)	100	150
Nikkeli (Ni)	100	150
Sinkki (Zn)	1 500	4 500 ⁴⁾

Edellä olevan taulukon huomiot on määritetty maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa (MMMa 24/11) lannoitevalmisteista seuraavasti:

¹⁾ Elohopean määrittäminen EPA 743-menetelmällä.

²⁾ 2,5 mg Cd/kg ka maa- ja puutarhataloudessa sekä viherkasvutaloudessa ja maisemoinnissa käytettävässä tuhkalannoitteissa tai niiden raaka-aineena käytettävässä tuhkassa.

³⁾ Sellaisenaan kalkitusaineena käytettävälle sivutuotteelle teräskuona (tyyppinimi 2A2/3) määritetään kromi liukoiseena kuuden arvoisena kromina (Cr 6+). Raja-arvo liukoiselle kuuden arvoiselle kromille on 2,0 mg/kg kuiva-ainetta.

⁴⁾ Enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteissa voidaan sallia, kun maaperäanalyysin perusteella on todettu puutetta kuparista tai sinkistä. Metsätaloudessa enimmäispitoisuuden ylitys lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa on sallittu ainoastaan sinkkiä suometsissä käytettäessä, silloin kun sinkin puute on kasvustosta todettu joko maaperä-, lehti- tai neulasanalyysillä. Tällöin maksimimäärä sinkkiä lannoitevalmisteena käytettävässä sivutuotteessa saa olla enintään 6000 mg Zn/kg ka.

5.6 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2.5.2013

Valtioneuvoston asetuksessa (VNa 331/2.5.2013) kaatopaikoista (jäljempänä kaatopaikka-asetus) määritetään, kuinka jätteiden sijoituspaikoilla ehkäistään pinta- ja pohjaveden sekä maaperän ja ilman pilaantumista. Tämän lisäksi asetuksella kaatopaikoista pyritään torjumaan haitallisia ympäristövaikutuksia, jotka voivat aiheutua yleisesti kaatopaikoista sekä niiden olemassaolosta tai suunnittelusta. Asetuksen ohjeistuksen mukaisesti toteutetut kaatopaikat eivät aiheuta terveydellistä tai ympäristöllistä vaaraa tai haittaa niiden olemassaolon aikana tai käytöstä poistuessa. (VNa 331/2.5.2013)

Jotta jätettä voidaan sijoittaa kaatopaikalle, tulee jätteen täyttää kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset) määrittämät kelpoisuusvaatimukset, joita tietyltä jätejakeelta odotetaan. Kelpoisuusvaatimukset erilaisille jätejakeille vaihtelevat, jonka lisäksi myös jätteen sijoituspaikka vaikuttaa kelpoisuusvaatimusten raja-arvoihin. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 säädetyt kelpoisuusvaatimukset jätejakeille ovat tämän työn Liitteenä 2. Kaatopaikka-asetus määrittää jätteelle tehtävät näytteenotto- ja testausmenetelmät, jotka perustuvat eurooppalaisen standardisoimisjärjestön (CEN) standardeihin (EN) sekä teknisiin spesifikaatioihin (TS). (VNa 331/2.5.2013)

Kaatopaikka-asetuksen kohdassa 28 § mainitaan, että energiantuotannossa tai jätteen poltossa syntyvä lento- ja pohjatuhka voidaan sijoittaa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle, mikäli se täyttää sille määritetyt poikkeavat kelpoisuusvaatimukset. Lento- ja pohjatuhkalle valtioneuvoston asetuksessa kaatopaikoista määritetyt kelpoisuusvaatimukset ovat, että liuenneen orgaanisen hiilien pitoisuus on alle 800 mg/kg, kun nesteen ja kiinteän aineen suhde on 10 l/kg kuiva-ainetta kohden jätteen omassa pH:ssa tai kun pH on 7,5–8. (VNa 331/2.5.2013)

5.7 Jätelaki 646/17.6.2011

Jätelain (L 646/17.6.2011) avulla on tarkoitus ehkäistä terveydelliset sekä ympäristölliset vaarat ja haitat, jotka voivat aiheutua jätteistä tai jätehuollosta. Lisäksi jätelain avulla pyritään varmistamaan, että luonnonvarojen käyttö on kestävää sekä vähentämään jätteen määrää ja haitallisuutta. (L 646/17.6.2011)

Jätelaki velvoittaa toiminnanharjoittajia noudattamaan etusijajärjestystä, joka on määritelty tämän työn kappaleessa 1 Johdanto. Etusijajärjestyksen avulla on pyritty pääsemään eroon jätteen sijoittamisesta kaatopaikoille. Etusijajärjestyksen mukaan toiminnanharjoittajien tulee ensisijaisesti vähentää syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta sekä pyrkiä kierrättämään syntynyt jäte. (L 646/17.6.2011)

Jätelaki määrittelee jätteen aineeksi tai esineeksi, joka tulee joka tapauksessa poistumaan toiminnanharjoittajan käytöstä eikä sille ole jatkokäyttöä. Sivutuote määritellään aineeksi tai esineeksi, jolla on olemassa oleva jatkokäyttökohde ja sitä voidaan käyttää joko sellaisenaan tai muokata jatkokäyttöön sopivaksi. Olennaista kuitenkin on, että sivutuote

tai sen käyttö eivät aiheuta haittaa tai vaaraa ympäristölle eikä terveydelle. Tällöin jätelain mukaan on mahdollista määritellä voimalaitoksella syntyvä tuhka sivutuotteeksi jätteen sijaan. (L 646/17.6.2011)

5.8 Valtioneuvoston asetus jätteistä 179/2012

Valtioneuvoston asetus (VNa 179/2012) jätteistä (jäljempänä jäteasetus) tukee jätelakia (L 646/17.6.2011). Jäteasetuksen liitteessä 1 (Hyödyntämistoimet) ja liitteessä 2 (Loppukäsittelytoimet) on määritetty ne toimet, joita voidaan käyttää jätteen hyödyntämiseen ja loppukäsittelyyn. Jäteasetuksen liitteessä 4 (Jäteluettelo: yleisimmät jätteet sekä vaaralliset jätteet) on lueteltu esimerkit yleisimmistä jätteistä, joka sisältää muun muassa voimalaitoksissa syntyvät tuhkat (pohja-, kattila- ja lentotuhka). (VNa 179/2012)

5.9 Jäteverolaki 1126/17.12.2010

Jäteverolain (L 1126/17.12.2010) mukaisesti jätteestä, joka sijoitetaan kaatopaikalle, tulee maksaa valtiolle veroa, yhdeltä tonnilta jätettä veloitetaan 70 euroa. Verotettavat jätteet on eritelty jäteverolain liitteenä olevassa verotaulukossa. Jäteverolaissa kuitenkin todetaan, ettei veroa tarvitse maksaa sellaisesta jätteestä, joka hyödynnetään kaatopaikalla esimerkiksi sen perustamISRakenteissa. (L 1126/17.12.2010)

5.10 REACH-asetus

Euroopan unioni on säätänyt REACH-asetuksen (European Chemicals Agency 2020) turvaamaan ihmisten terveyttä ja ympäristöä riskeiltä ja haitoilta, joita kemikaalit voivat aiheuttaa. REACH-asetuksen avulla varmistetaan kemikaalien rekisteröinti, arviointi sekä lupamenettelyt ja rajoitukset, joiden perusteella REACH-asetuksen englanninkielinen kirjainlyhenne on muodostettu (Registration, Evaluation, Authorisation, Restriction of Chemicals). Lisäksi EU:ssa tehostetaan kilpailukykyä kemikaaliteollisuudessa REACH-asetuksen avulla, kun kemikaaleja voidaan vapaasti kuljettaa sisämarkkinoilla. REACH-asetus velvoittaa toiminnanharjoittajia hallitsemaan ja tunnistamaan kemikaalien riskejä sekä ilmoittamaan kemikaalien turvalliset käyttöohjeet kuluttajille. REACH-asetus on tullut voimaan kesäkuun 1. päivänä 2007. (European Chemicals Agency 2020)

Aine tai kemikaali on rekisteröitävä REACH-asetuksen mukaisesti, kun sitä ei voida määrittellä jätteeksi jätelain (L 646/17.6.2011) perusteella. Rekisteröintivelvollisuus tarkoittaa kaikkia aineita, joko sellaisenaan tai seoksissa sekä mahdollisesti myös esineissä olevia aineita tietyissä tapauksissa. REACH-asetuksen perusteella rekisteröinti tehdään yhdelle aineelle vain yhden kerran, jolloin valmistajat ja maahantuojat rekisteröivät aineen yhdessä. Yleensä aineen rekisteröinnistä veloitetaan. (European Chemicals Agency 2020)

6 NÄYTTEENOTTO JA LABORATORIOANALYYSIT

Tässä työssä kokeellisen tutkimuksen tavoitteena oli selvittää monipolttoainetuhkan koostumus sekä tarkastella millaiseen hyötykäyttöön tuhka koostumukseltaan soveltuu. Monipolttoainetuhkan koostumuksen selvittämiseksi biovoimalaitokselle on laadittu systemaattinen näytteenottosuunnitelma, joka määrittää näytteenoton ajanjaksot ja tarvittavat näytekoot. Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkien näytteenotto toteutettiin yhteistyössä tuhkakuljettajan kanssa, sillä näytteenotto ei onnistu biovoimalaitoksen alueella. Tämän vuoksi osanäytteet kerättiin Oulun Energian tuhkan läjityspaikalta.

Näytteiden analysoiminen toteutettiin yhteistyössä kolmen laboratorion kanssa. Tuhkanäytteitä analysoitiin yhdessä akkreditoidussa laboratoriossa sekä kahdessa muussa tutkimuslaboratoriossa. Akkreditoidun laboratorion avulla varmistetaan, että kemiallisten analyysien tuottamat pitoisuudet tarkasteltaville aineille täyttävät vaaditut lait, asetukset ja standardit. Lisäksi akkreditoidun laboratorion avulla varmistettiin kemiallisten analyysien edustavuus sekä saatiin vertailtua muiden tutkimuslaboratorioiden kemiallisia analyysituloksia. Tutkimuslaboratorioita 1 ja 2 hyödynnettiin tuhkanäytteiden analysoimisessa, sillä sieltä kemialliset analyysitulokset olivat nopeammin saatavilla. Tutkimuslaboratorioita 1 ja 2 hyödyntämällä mahdollistettiin nopeampi reagointikyky biovoimalaitoksen kattilan toimintaan, kuten käytettävään polttoainejakaumaan. Tämän lisäksi säännöllisen näytteenoton avulla oli mahdollista havaita, millaisia vaikutuksia tehdyillä muutoksilla on ollut erityisesti monipolttoainetuhkan koostumukseen. Tutkimuslaboratorio 1 käyttää analyysimenetelmään erilaisia pikatestausmenetelmiä, jotka eivät ole akkreditoituja. Analyysitulokset voivat siis vaihdella eri laboratorioiden välillä johtuen erilaisista analyysimenetelmistä.

Tutkimuslaboratorio 1 käytti raskasmetallien analysoimiseen röntgenfluoresenssimenetelmää (XRF), jolla saatiin nopeasti määritettyä tuhkanäytteiden sisältämät alkuaineet. Röntgenfluoresenssimenetelmää käytettäessä hyödynnetään röntgensäteilyn aallonpituudella toimivaa säteilylähdettä, kuten röntgenputkea, jonka avulla tutkittavaa näytettä säteilytetään. Röntgensäteilyn energia on tarpeeksi voimakas irrottamaan alkuaineen (atomin) ytimen vaikutuspiiristä, eli sisimmältä kuorelta, elektronin. Atomi, jonka sisimmältä kuorelta puuttuu elektroni, korvaa puuttuvan elektronin ulommalla kuorella sijaitsevalla elektronilla. Jokaisella alkuaineella on

erilainen elektronirakenne, joten energiaero, joka muodostuu elektronin siirtymisestä, on spesifi. Tämän myötä jokainen alkuaine on tunnistettavissa syntyvästä karakteristisesta säteilystä. Myös näytteen sisältämien alkuaineiden pitoisuudet saadaan määritettyä syntyvän säteilyn intensiteetin perusteella. (Laine-Ylijoki et al. 2003) Liukoisen sulfaatin pitoisuuden määrittämiseksi tutkimuslaboratorio toteutti 1-vaiheisen ravistelukokeen tuhkanäytteille. Ravistelukoe tehtiin standardin SFS 12457-2 ravistelukokeen mukaisesti. Tämän jälkeen saadusta suodoksesta analysoitiin sulfaatin liukoinen pitoisuus käyttämällä Macherey-Nagel Nanocolor -pikatestiä. Raskasmetallianalyysin ja liukoisen sulfaatin pitoisuuden lisäksi tutkimuslaboratorio suoritti hehkutushäviöanalyysin tuhkanäytteille 550 °C lämpötilassa.

Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriota (tutkimuslaboratorio 2) hyödynnettiin tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuden analysoimiseen ja kyseiset analyysit toteutettiin itsenäisesti. Kuiva-ainepitoisuusanalyysi toteutettiin standardin SFS-EN 15934 menetelmän A mukaisesti. Standardin mukaan näytteen sisältämän veden ei katsota olevan osa näytettä, vaan tavallisesti analyysitulokset liittyvät näytteen kuiva-aineosuuteen (SFS-EN 15934:2012). Kuiva-ainepitoisuusanalyysi on menetelmältään yksinkertainen, joten analyysin toteutus ja tulosten saaminen oli suhteellisen nopeaa. Analyysin tavoitteena oli selvittää tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuudet. Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) liitteen 2 (Näytteenotto- ja testausmenetelmät kaatopaikkakelpoisuuden arvioinnissa) mukaan jätteen yleiset ominaisuudet, mukaan lukien kuiva-ainepitoisuus, tulee määrittää, jotta voidaan todeta jätteen kaatopaikkakelpoisuus.

6.2 Näytteenottosuunnitelma

Laanilan biovoimalaitokselle on laadittu näytteenottosuunnitelma, jotta koostumukset sekä hyötykäyttömahdollisuudet muodostuvalle monipolttoainetuhkalle saadaan selvitettyä. Yhtenäinen näytteenottosuunnitelma edistää myös näytteenoton systemaattisuutta sekä tulosten vertailukelpoisuutta. (Tihinen 2020a)

Kaikista biovoimalaitoksella syntyvistä tuhista (kattila-, lento- ja pohjatuhka) otetaan MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liitteen 3 (Jätteen laadunhallinta) mukaiset näytteet. Kattila-, lento- ja pohjatuhista määritetään analyysit MARA-asetuksen,

lannoiteasetuksen (MMM 24/2011) sekä kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2013) mukaisesti. (Tihinen 2020a)

Tuhkanäytteet otetaan kahden viikon kokoomanäytteenä märstä lento- ja kattilatuhkasta sekä kuivasta pohjatuhkasta. Osanäyte otetaan jokaisesta Laanilan biovoimalaitokselta lähtevästä tuhakuormasta. Osanäytteen määrä lento- ja kattilatuhkalle on 4 litraa ja pohjatuhkan osanäytteen määrä on 1 litra. Osanäytteet otetaan märstä lento- ja kattilatuhkasta Oulun Energian tuhkan läjityspaikalla Miehonsuolla. Osanäyte pohjatuhkasta otetaan biovoimalaitoksella tuhkakontista, johon pohjatuhka kerätään ennen kuljetusta tuhkan läjitysalueelle Miehonsuolle. Osanäytteet kerätään muovipusseihin, jotka kuljetetaan Toppilaan säilytettäväksi kannellisiin muovisaaveihin. Kun kokoomanäyte on kerätty kahden viikon ajalta, tuhkien osanäytteet yhdistetään ja sekoitetaan betonimyllyssä, jonka jälkeen kokoomanäytteestä otetaan seuraavat laboratorionäytteet jokaisesta tuhkatuotteesta (kattila-, lento- ja pohjatuhka):

- yksi noin 5 litran laboratorionäyte (akkreditoitu laboratorio)
- yksi noin litran laboratorionäyte (tutkimuslaboratorio 1)
- yksi noin 0,5 litran laboratorionäyte (tutkimuslaboratorio 2)

Näiden lisäksi jokaisesta tuhkatuotteesta otetaan vastaavat rinnakkaisnäytteet. Mikäli laboratorionäyte on tarpeellista uusia, niin siihen käytetään säilytettyä rinnakkaisnäytettä.

Näytteenotto on opastettu tuhkakuljettajalle, joka ottaa osanäytteet biovoimalaitoksen tuhkista. Laboratorio- ja rinnakkaisnäytteet tehdään yhteistyössä tuhkakuljettajan kanssa. Laboratoriossa tuhkanäytteistä analysoidaan Taulukossa 4 esitettyjen menetelmien mukaisesti määritetyt muuttujat. (Tihinen 2020a)

Taulukko 4. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden analysointi (mukaillen Tihinen 2020a).

Määritettävä muuttuja	Menetelmä	Määrittelyn peruste
Liukoisuus: Sb, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Mo, Ni, V, Zn, Se, F ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , DOC, fenoli-indeksi, TDS	Määrittely: standardin CEN/TS 14405 mukainen läpivirtaustesti tai standardin SFS-EN 12457-3 mukainen kaksivaiheinen ravistelutesti tai vastaavaa menetelmää. Liukoisuustestien uuttoliuokset on määritettävä standardien SFS-EN 12506, SFS-EN 13370 ja SFS-EN 16192 mukaisin menetelmin. Liukoinen orgaaninen hiili (DOC) on määritettävä teknisen spesifikaation CEN/TS 14429 tai CEN/TS 14997 mukaisesti.	MARA-asetus (VNa 843/2017), Kaatopaikka-asetus (VNa 331/2013)
Pitoisuus: PAH-yhdisteet	Standardin SFS-EN 15527 tai standardin SFS-ISO 18287 mukainen menetelmä tai muu vastaava menetelmä.	MARA-asetus (VNa 843/2017), Kaatopaikka-asetus (VNa 331/2013)
Pitoisuus: P, K, Ca, As, Hg, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn	Uutto HNO ₃ /HCl, analysointi ICP-MS, ICP-OES tai AAS	Lannoiteasetus (MMM 24/2011)
Pitoisuus: PCB, mineraaliöljy (C10-C40), TOC, BTEX, pH, ANC	Määritettävä standardien SFS-EN 13137 (orgaanisen hiilen kokonaismäärä), EN 15934 (kuiva-aineksen laskeminen), SFS-EN 15169 (heh-kutushäviö), SFS-EN 15308 (PCB-kongeneerit) ja SFS-EN 15527 (PAH-yhdisteet) mukaisesti. Happo-neutralointikapasiteetti ANC on määritettävä teknisen spesifikaation CEN/TS 15364 (vaihtoehtoisesti CEN/TS 14429 tai CEN/TS 14997) mukaisesti.	Kaatopaikka-asetus (VNa 331/2013)

6.3 Kuvaus näytteenotosta

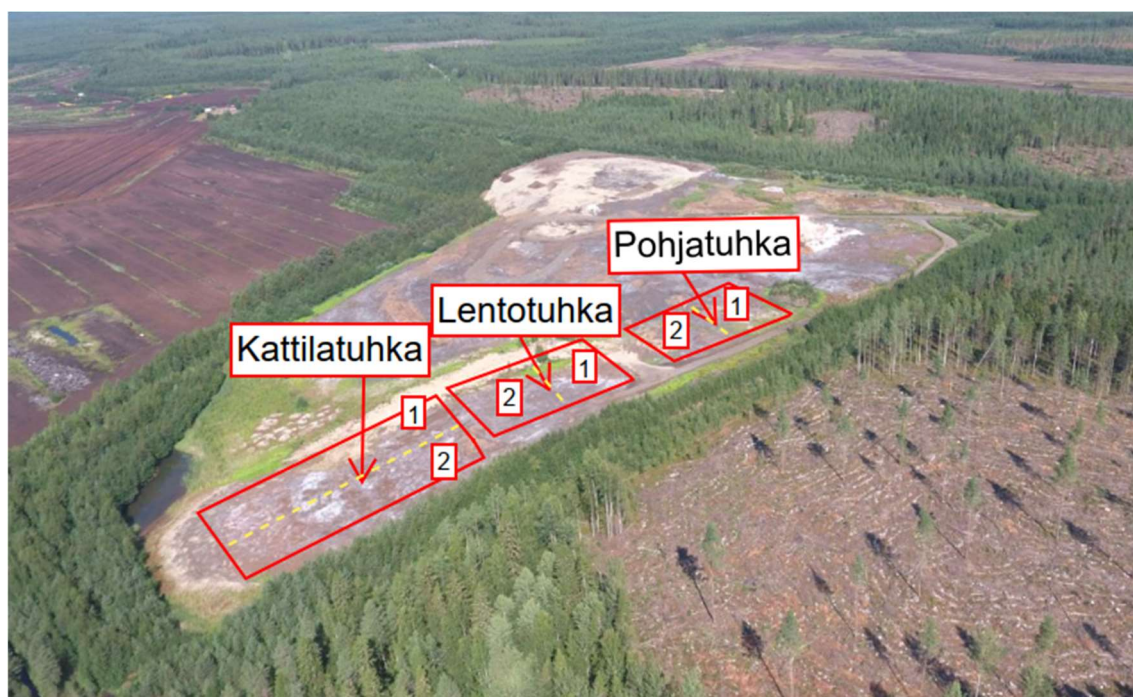
Laanilan biovoimalaitoksen näytteenotto-ohjeessa (Tihinen 2020b) tuhkakuljettajaa on opastettu ottamaan osanäytteet seuraavalla tavalla:

Tarvikkeet: näytteenotin (metallinen kauha, 1 litra), näytepusi, permanent-tussi.

Näytteenotto-ohje:

1. Saavuttuasi Michonsuolle, pura tuhakuorma sille osoitettuun paikkaan (kts. Kuva 5).

2. Ota näytteenottomella neljä kauhallista tuhkaa. Jokainen kauhallinen tulee ottaa eri kohdista tuhkakasaa.
3. Laita ottamasi tuhkakauhalliset näytepussiin (4 litraa/näytepussi).
4. Sulje näytepussit huolellisesti ja kirjoita näytepusseihin näytteenoton päivämäärä sekä mitä tuhkaa näytepussi sisältää (lentotuhka, kattilatuhka tai pohjatuhka), merkitse myös tuhkan varastoalueen numero.
5. Ota näytepussi mukaasi ja kuljeta se Toppilaan tuhkahalliin tuhkan osanäytteelle nimettyyn ja numeroituun (lentotuhka, kattilatuhka tai pohjatuhka) muovisaaviin.



Kuva 5. Periaatekuva tuhakuormien purkupaikoista Oulun Energian tuhkan läjitysalueella Miehonsoolla (Tihinen 2020b).

Oulun Energian tuhkaläjitysalueelle on tehty varastoalueet biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkalle, jotta tuhkat saadaan pidettyä erillisinä kasoina. Erilliset kasat estävät tuhkien sekoittumisen, jolloin tuhkia voidaan mahdollisuuksien mukaan viedä läjitysalueelta hyötykäyttöön tai jatkokäsittelyyn. Jokaiselle tuhkatuotteelle on kaksi aluetta, alue 1 ja alue 2. Kokoomanäytteiden tuhkuormat kasataan ensin alueelle 1 kahden viikon ajan, jonka jälkeen siirrytään alueelle 2. (Tihinen 2020b)

6.4 Laboratorioanalyysi: Kuiva-ainepitoisuus

Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriossa toteutetaan kuiva-ainepitoisuusanalyysi, jotta saadaan vertailtua tuhkatuotteiden kuiva-ainepitoisuuksien analyysituloksia ja voidaan

siten varmistaa tulosten luotettavuus. Lisäksi itsenäinen laboratorioanalyysin suoritus antaa kokonaisvaltaisemman kuvan tuhkien kemiallisen koostumuksen tutkimuksesta sekä nopeuttaa kemiallisten analyysitulosten saantia. Kemiallisten analyysitulosten nopeampi saatavuus edistää reagointimahdollisuutta, mikäli tulokset osoittavat muutokset esimerkiksi polttoainejakaumassa tarpeellisiksi.

Analyysimenetelmänä noudatetaan standardin SFS-EN 15934 (SFS-EN 14346 kumottu) menetelmän A mukaista kuiva-ainejäännös menetelmää, jossa näytteet kuivataan uunissa 105 °C lämpötilassa. Suoritin laboratorioanalyysin itsenäisesti ja saamiani tuloksia verrataan akkreditoidussa laboratoriossa saatuihin tuloksiin. Kokoomanäytteestä otetaan pieni noin 0,5 litran näyte, josta laboratoriossa otetaan kolme noin 5 g:n rinnakkaisnäytettä jokaisesta tuhkatuotteesta (pohjatuhka, kattilatuhka, lentotuhka).

Analyysin suoritus:

1. Upokkaat asetetaan uuniin vähintään 30 minuutiksi. Tämän jälkeen upokkaat jäähdytetään normaaliin lämpötilaan (huoneenlämpötila) ja punnitaan 1 mg:n tarkkuudella. Kirjataan upokkaiden massat paperille.
2. Punnitaan upokkaisiin noin 5 g näytettä (1 mg:n tarkkuudella). Kirjataan näytteiden massat paperille (Kuvat 6 ja 7).



Kuva 6. Näytteiden punnitus.



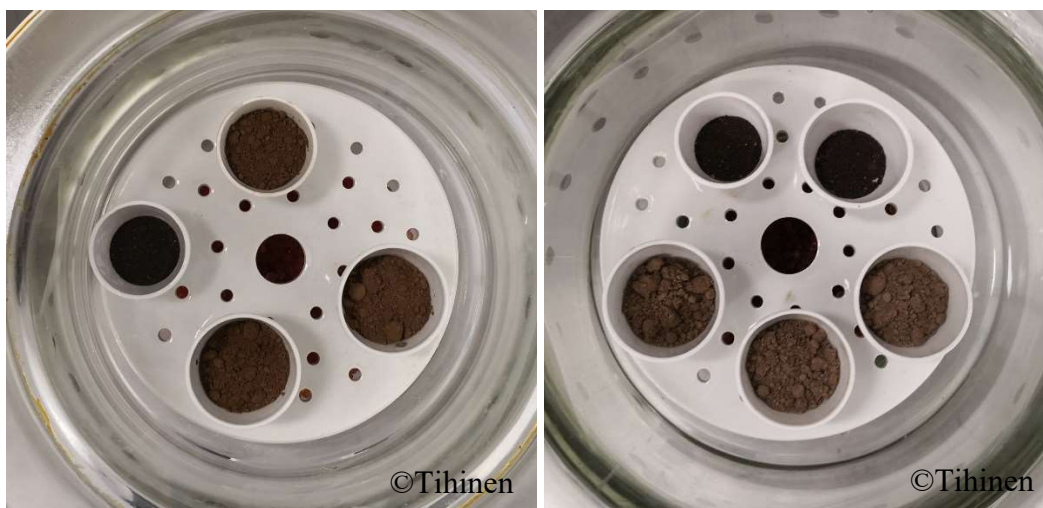
Kuva 7. Näytteet eksikaattoreissa 1 (vasen) ja 2 (oikea) punnittuina ennen kuivausta.

3. Asetetaan upokkaat näytteineen uuniin 105 °C viideksi tunniksi (Kuva 8).



Kuva 8. Näytteet kuivataan viisi tuntia uunissa 105 °C:ssa.

4. Näytteet jäädytetään huoneenlämpöisiksi eksikaattoreissa (Kuvat 9 ja 10), jonka jälkeen jäähtyneet upokkaat näytteineen punnitaan. Kirjataan saadut tulokset paperille.



Kuva 9. Näytteet eksikaattoreissa 1 (vasen) ja 2 (oikea) viiden tunnin kuivauksen jälkeen.



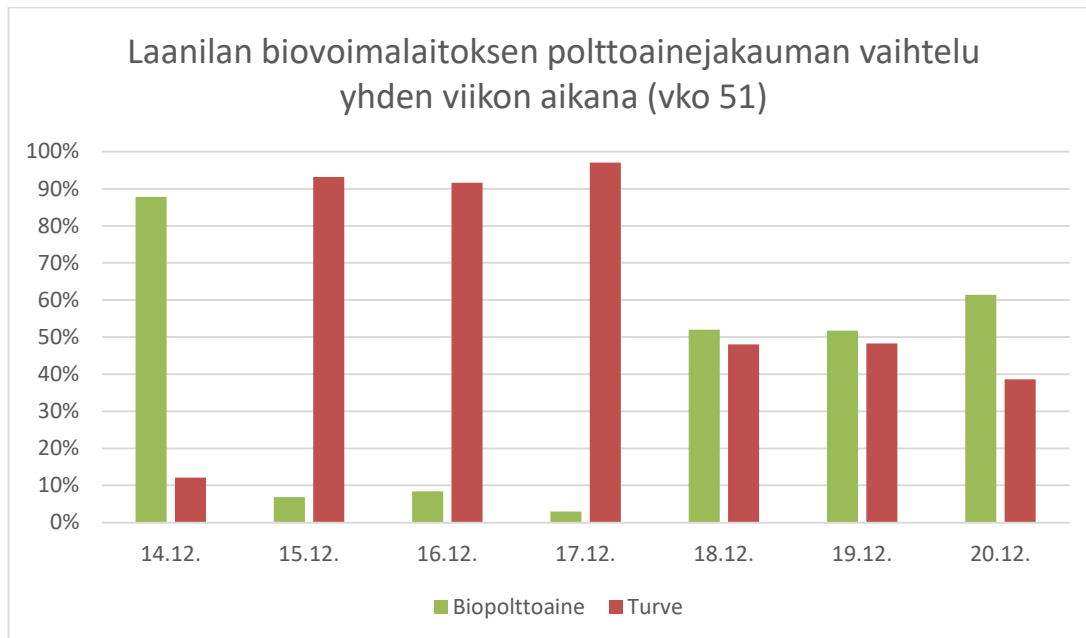
Kuva 10. Näytteet jäähdytetään huoneenlämpöisiksi eksikaattoreissa.

5. Asetetaan upokkaat näytteineen uudelleen uuniin 105 °C 1 tunnin ajaksi. Näin varmistetaan, että kuiva-ainejäännöksen massa on vakiintunut, kun näytteen massa poikkeaa edellisestä punnituksesta max 0,5 % tai 2 mg. Kirjataan saadut tulokset paperille. Saaduista arvoista valitaan suurempi.

6.5 Polttoainetase

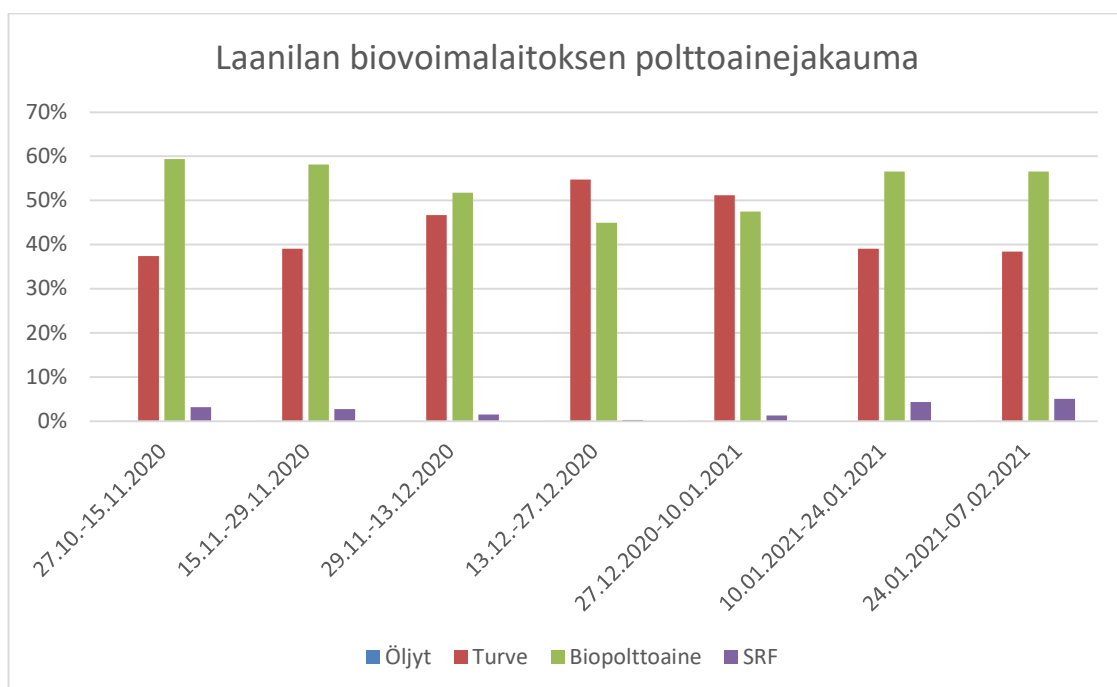
Polttoainetaseet taulukoitiin samoilta ajanjaksoilta kokoomanäytteiden kanssa, jotta voidaan nähdä, millaisia vaikutuksia polttoainejakaumalla on kiertoileijukattilassa muodostuvien tuhkien koostumuksiin. Kyseisillä ajanjaksoilla polttoainejakauma vaihteli jonkin verran, koska biovoimalaitoksella toteutettiin erilaisia koeajoja ja testailtiin kattilan toimintaa. Testaukset sisälsivät muun muassa eri ääripäiden ajomalleja, joiden

aikana kattilassa poltettiin 100 % polttoainejakaumalla sekä turvetta että biopolttoainetta. Alla olevassa Kuvassa 11 näkyy koeajojaksolta yhden viikon polttoainejakauma, josta voi erityisen selkeästi havaita, kuinka voimakkaasti polttoainesuhteet ovat vaihdelleet lyhyelläkin aikavälillä.



Kuva 11. Esimerkki yhden viikon polttoainejakauman vaihtelusta koeajojaksolla (vko 51).

Tammikuun aikana polttoainejakauma on ollut vakio ja talvikaudella 2021 jatketaan vastaavalla polttoainejakaumalla. Kuitenkin polttoainesuhteet voivat vaihdella tilanteen mukaan, mikäli erilainen polttoainesuhde osoittautuu kannattavammaksi esimerkiksi päästöjen kannalta. Oulun Energian hiilineutraalisuustavoitteet ohjaavat Laanilan biovoimalaitoksella käytettäviä polttoainesuhteita, jotta energiantuotanto saavuttaisi hiilineutraalisuuden 2030-luvun aikana (Oulun Energia 2021). Alla olevassa Kuvassa 12 on esitetty Laanilan biovoimalaitoksen polttoainejakauma kokeellisen tutkimuksen aikana. Kokonaisuudessaan aikavälillä 27.10.2020 - 7.2.2021 poltettiin keskimäärin 53 % biopolttoainetta, 44 % turvetta ja 3 % SRF-polttoainetta.



Kuva 12. Laanilan biovoimalaitoksen polttoainejakauma 27.10.2020 - 7.2.2021 väliseltä ajalta.

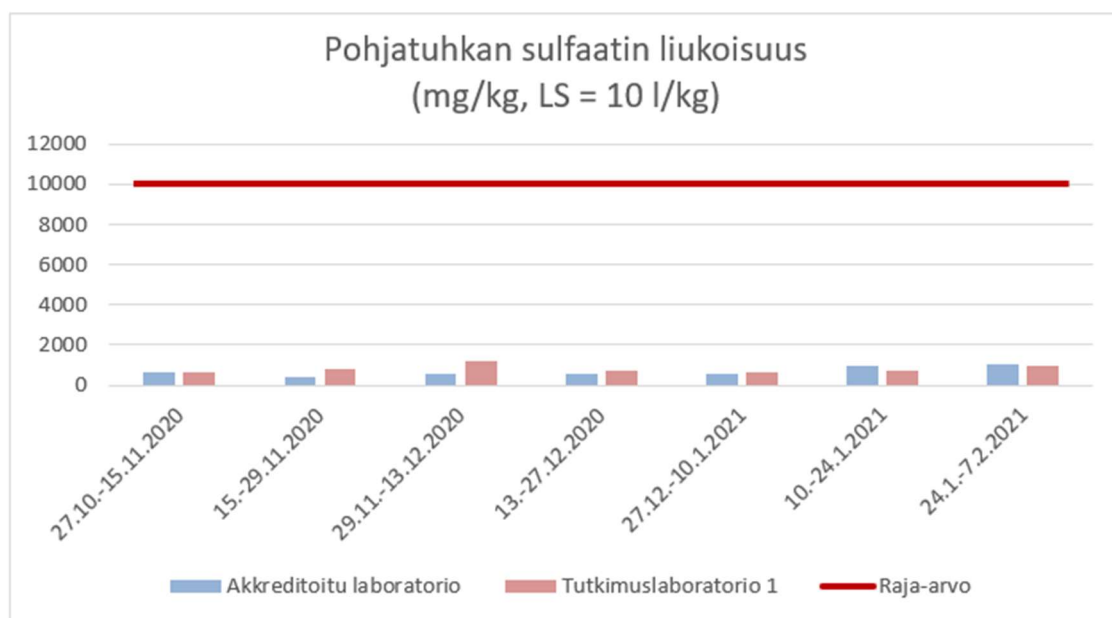
7 TULOSTEN TARKASTELU

Akkreditoidun laboratorion ja kahden muun tutkimuslaboratorion antamia kemiallisia analyysituloksia Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkasta verrataan toisiinsa. Hyötykäyttökelpoisuuden todentamista varten kemiallisia analyysituloksia verrataan lainsäädännön määrittämiin laatuvaatimusten raja-arvoihin ja tarkastellaan, täyttyvätkö lainsäädännön asettamat laatu- ja kelpoisuusvaatimukset suoraan kemiallisten analyysitulosten perusteella. Tässä työssä biovoimalaitoksen tuhkatuotteiden hyötykäyttökelpoisuutta tarkastellaan erityisesti MARA- ja lannoiteasetusten perusteella. Lisäksi kemiallisia analyysituloksia verrataan myös kaatopaikka-asetuksen raja-arvoihin, jotta voidaan varmistua tuhkatuotteiden kaatopaikkakelpoisuudesta. Biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkan kemialliset analyysitulokset on koottu tämän työn Liitteisiin 3–6.

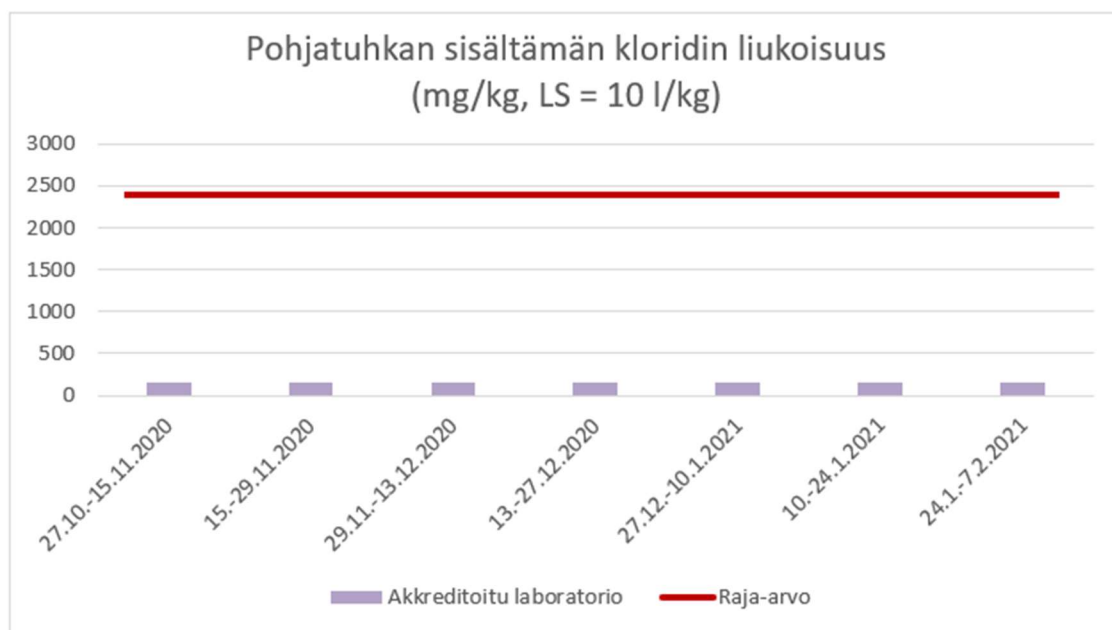
Kemiallisten analyysitulosten osoittaessa, ettei monipolttoainetuhka täytä edellä mainittujen asetusten laatuvaatimuksia, tuhka ei kuitenkaan suoraan ole hyötykäyttökelvoton. Tällaisessa tapauksessa voidaan monipolttoainetuhkan hyötykäyttöä varten hakea erillistä lupaa muun muassa MARA-asetuksen tai ympäristöluvan kautta. Ympäristölupa voi tapauskohtaisesti sallia tuhkan hyötykäytön, mikäli hyötykäyttökohde osoittautuu soveltuvaksi vaihtoehdoksi. Esimerkiksi Suomen läntinen rannikkoalue on osoittautunut happamaksi sulfaattimaaksi, joka tarkoittaa maaperän luonnollista sulfaattipitoisuuden kasvua (Hadzic 2018). Tällöin sulfaatin pitoisuus voi maaperässä olla korkeampi kuin lainsäädännön määrittämissä raja-arvoissa, joita hyötykäytettävältä tuotteelta vaaditaan. Tällöin on syytä hankkia ympäristölupa sellaiselle tuhkatuotteelle, jonka sulfaattipitoisuus ylittää MARA-asetuksessa määritetyn raja-arvon. Ympäristöluvan lisäksi asetukset sisältävät poikkeuksia, joiden mukaan raja-arvoja voidaan korottaa tai niitä ei tarvitse tietyissä tapauksissa huomioida. Esimerkiksi MARA-asetuksen (VNa 843/2017) perusteella Laanilan biovoimalaitoksen tuhkatuotteita voisi olla mahdollista hyötykäyttää sellaisilla alueilla, joiden etäisyys on enintään 500 metriä merestä, rakenteen läpi suotautuva vesi purkautuu merta kohti sekä meren ja rakenteen välillä ei ole kaivoja, joita käytetään talousvedenottoon. Hyötykäyttökohteen täyttäessä edellä mainitut ehdot, MARA-asetuksen asettamia raja-arvoja kloridin, sulfaatin ja fluoridin liukoisuuksille ei sovelleta. (VNa 843/2017)

7.2 Pohjatuhkan analyysitulosten tarkastelu

Pohjatuhkan koostumusta tarkasteltiin MARA-asetuksen (VNa 843/2017) yleisen käyttökohteen eli päällystetyn kenttärakenteen laatuvaatimusten perusteella. MARA-asetuksen liite 2 (Haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerrosspaksuus maarakentamiskohteessa) on tämän työn Liitteenä 1, jonka mukaan pohjatuhkan laboratorioanalyysituloksia on käyty läpi. Kokeellisen tutkimuksen aikana 27.10.2020 - 7.2.2021 pohjatuhkan sulfaatin ja kloridin liukoisuuksien tulokset alittivat raja-arvot reilusti, joten pohjatuhka täytti MARA-asetuksessa määritetyt päällystetyn kenttärakenteen laatuvaatimukset ja soveltuu hyötykäyttöön maarakentamisessa. Alla olevissa Kuvissa 13 ja 14 näkyy pohjatuhkan kemialliset analyysitulokset sulfaatin ja kloridin liukoisuuksien osalta. Kuvaan 13 on kerätty vertailun vuoksi akkreditoidusta (Liite 3 Taulukko 1) ja toisesta tutkimuslaboratoriosta (tutkimuslaboratorio 1) (Liite 4 Taulukko 1) saadut kemialliset analyysitulokset. LS-suhde tarkoittaa veden määrän (L) suhdetta tutkittavan jättemateriaalin (tuhkan) määrään (S). Hyötykäyttöä varten pohjatuhkalle haettiin ELY-keskukselta lupaa jo kokeellisen tutkimuksen aikana, koska pohjatuhkan kuljettaminen hyötykäyttöön suoraan biovoimalaitokselta on kannattavampaa sekä kustannusten että kuljetusten kannalta.



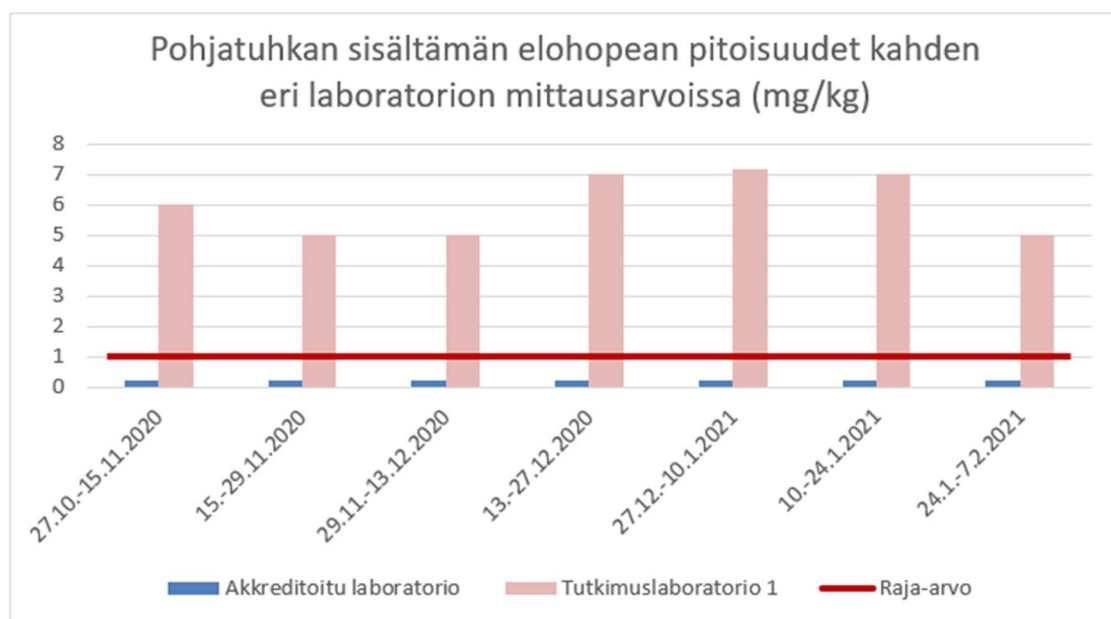
Kuva 13. Pohjatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta ja tutkimuslaboratoriosta 1. Pohjatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus alittaa MARA-asetuksen määrittämän sulfaatin liukoisuuden raja-arvon. (LS-suhde tarkoittaa veden määrän (L) suhdetta tutkittavan jättemateriaalin (tuhkan) määrään (S).)



Kuva 14. Pohjatuhan sisältämän kloridin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemiaalliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta. Pohjatuhan sisältämän kloridin liukoisuus alittaa MARA-asetuksen määrittämän kloridin liukoisuuden raja-arvon.

Pohjatuhan koostumusta tarkasteltiin lannoiteasetuksen (MMM 24/11) metsätuhalannoitteen tai niiden raaka-aineena käytettävän tuhan laatuvaatimusten perusteella. Laatuvaatimukset metsätuhalannoitteen enimmäispitoisuuksille on esitetty tämän työn kappaleessa 6.4 Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (kts. Taulukko 3). Akkreditoidusta laboratoriosta saadut kemialliset analyysitulokset (Liite 3 Taulukko 2) osoittivat, että pohjatuha täyttää laatuvaatimukset ja olisi hyötykäyttökelpoinen metsätuhalannoitteena tai sen raaka-aineena. Kemiaallisissa analyysituloksissa oli suhteellisen suuria eroja akkreditoidun laboratorion ja tutkimuslaboratorion 1 (Liite 4 Taulukko 1) tulosten välillä. Tutkimuslaboratorion 1 käyttämä pikatestausmenetelmä raskasmetallien pitoisuuksien mittaamiseen antoi merkittävästi suuremmat arvot, jotka ylittivät lannoiteasetuksen enimmäispitoisuusrajat. Alla olevaan Kuvaan 15 on koottu akkreditoidusta laboratoriosta ja tutkimuslaboratoriosta 1 saadut analyysitulokset elohopeapitoisuuksien osalta, jotka havainnollistavat analyysitulosten eroja. Tuhkanäytteiden alkuainekoostumus analysoitiin tutkimuslaboratoriossa 1 röntgenfluoresenssimenetelmällä (XRF), joka on esitelty tarkemmin aiemmin. Tutkimuslaboratorio 1 suoritti röntgenfluoresenssimäärittäyksen tuhkanäytteille kertamittauksena. Akkreditoidun laboratorion ja tutkimuslaboratorion 1 käyttämien analyysimenetelmien tarkkuudet ovat erilaiset, sillä akkreditoitu laboratorio suoritti standardin mukaisen analyysin tuhkanäytteiden

alkuainekoostumuksille. Akkreditoidusta laboratoriosta saaduilla kemiallisilla analyysituloksilla on enemmän painoarvoa, kun tarkastellaan lannoiteasetuksen laatuvaatimusten toteutumista pohjatuhkan osalta.



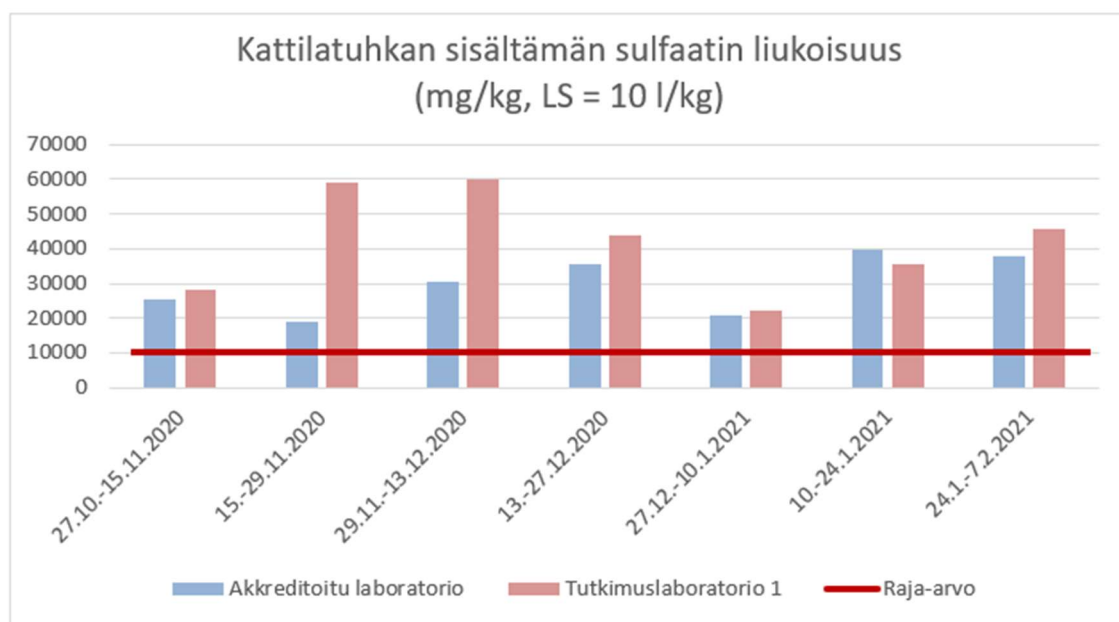
Kuva 15. Pohjatuhkan sisältämän elohopean pitoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta ja tutkimuslaboratoriosta 1. Pohjatuhkan sisältämän elohopean pitoisuudet eroavat huomattavasti laboratorioden kemiallisten analyysitulosten perusteella.

Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2013) kelpoisuusvaatimukset on esitetty tämän työn Liitteessä 2, johon on koottu kaatopaikka-asetuksen liitteessä 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset) esittämät kelpoisuusvaatimukset pysyvän jätteen, tavanomaisen jätteen ja vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Pohjatuhkan koostumuksen tarkastelu kaatopaikka-asetuksen perusteella osoitti, että kemiallisten analyysitulosten perusteella pohjatuhka täyttää pysyvän jätteen kaatopaikalle asetetut kelpoisuusvaatimukset (Liite 3 Taulukko 3). Pohjatuhkan ollessa hyötykäyttökelpoinen sekä MARA- että lannoiteasetuksen laatuvaatimusten perusteella, ei pohjatuhkaa ole taloudellisesti kannattavaa sijoittaa kaatopaikalle vaan se kannattaisi tässä tapauksessa hyödyntää metsätuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena.

7.3 Kattilatuhkan analyysitulosten tarkastelu

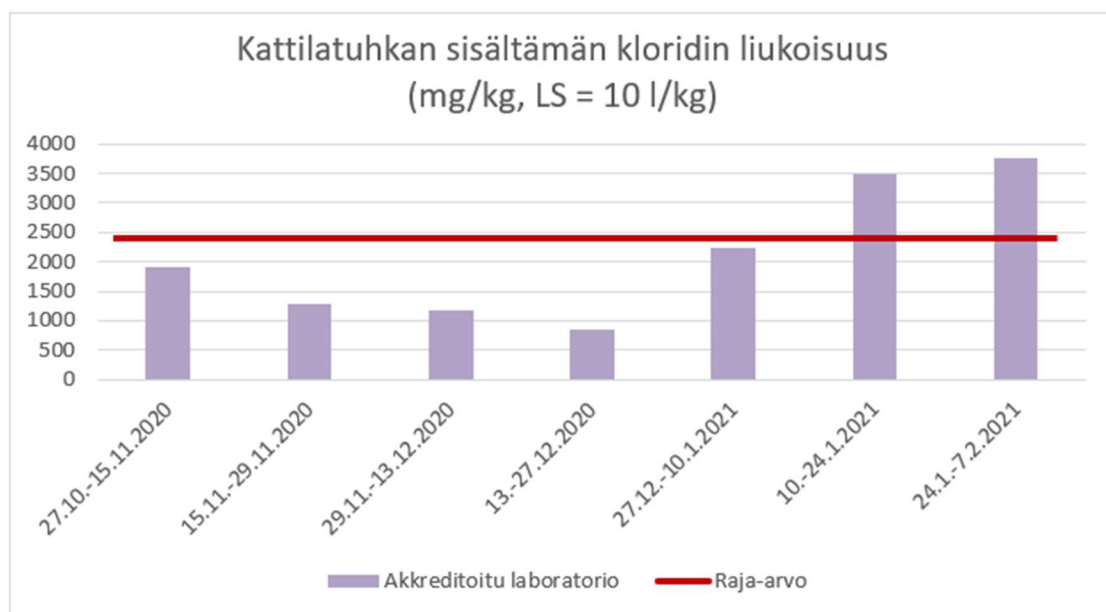
Kattilatuhkan koostumusta tarkasteltiin MARA-asetuksen (VNa 843/2017) yleisen käyttökohteen eli päällystetyn kenttärakenteen laatuvaatimusten perusteella. Saatuja laboratorioanalyysituloksia verrattiin MARA-asetuksen liitteen 2 määrittämiin

laatuvaatimuksiin. Kokeellisen tutkimuksen aikana 27.10.2020 - 7.2.2021 kattilatuhka ei täyttänyt kaikkia MARA-asetuksen laatuvaatimuksia päällystetylle kenttärakenteelle. Kattilatuhkan sisältämän liukoisen sulfaatin pitoisuus ylitti määritetyt raja-arvot jokaisen analyysituloksen perusteella (Liite 3 Taulukko 1 & Liite 4 Taulukko 1). Alla olevassa Kuvassa 16 näkyy kemialliset analyysitulokset kattilatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuuden osalta. Kuvaan 16 on kerätty vertailun vuoksi saadut kemialliset analyysitulokset sekä akkreditoidusta laboratoriosta että tutkimuslaboratoriosta 1. Tulosten välillä on jonkin verran eroavaisuuksia, jotka johtuvat erilaisista analyysimenetelmistä. Kuitenkin molempien laboratorioden kemiallisten analyysitulosten mukaan sulfaatin liukoisuus kattilatuhkassa ylittää asetuksen määrittämän raja-arvon.



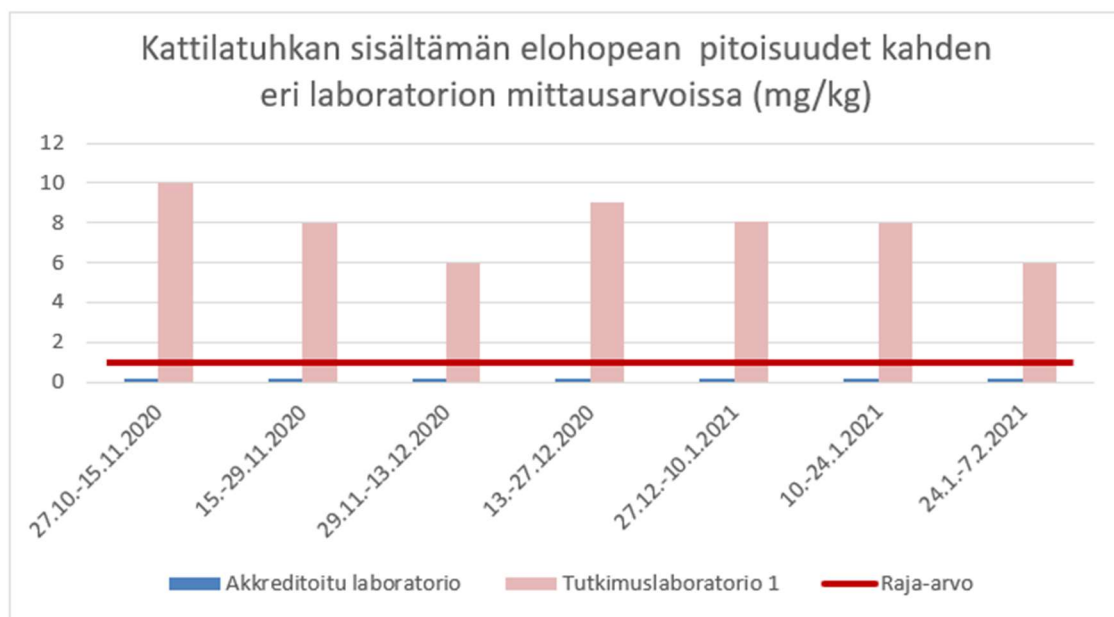
Kuva 16. Kattilatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta ja tutkimuslaboratoriosta 1. Kattilatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus ylittää MARA-asetuksessa määritetyn sulfaatin liukoisuuden raja-arvon.

Kattilatuhkan sisältämän kloridin liukoisuuden osalta saadut kemialliset analyysitulokset osoittivat kattilatuhkan täyttävän MARA-asetuksen määrittämät laatuvaatimukset, lukuun ottamatta kahta viimeisintä tuhkanäytettä. Alla olevassa Kuvassa 17 on esitetty kattilatuhkan sisältämän kloridin liukoisuuteen liittyvät kemialliset analyysitulokset. Tulokset on saatu akkreditoidusta laboratoriosta (Liite 3 Taulukko 1).



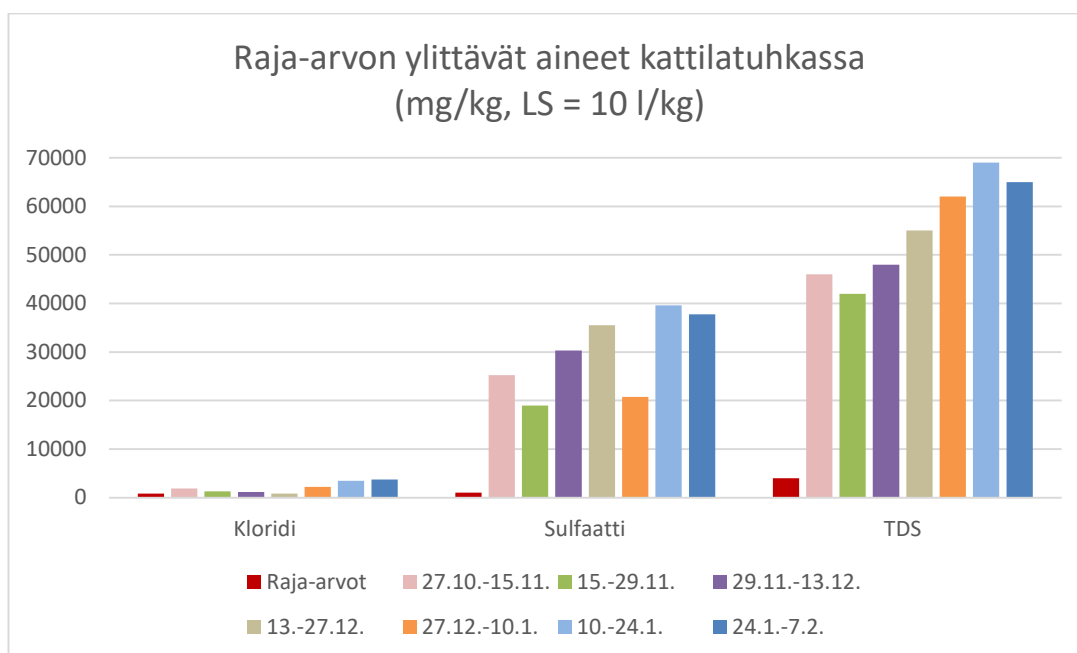
Kuva 17. Kattilatuhkan sisältämän kloridin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta. Kattilatuhkan sisältämän kloridin liukoisuus ylittää kahden viimeisen kemiallisen analyysituloksen perusteella MARA-asetuksen määrittämän raja-arvon.

Kattilatuhkan koostumusta tarkasteltiin lannoiteasetuksen (MMM 24/11) metsätuhalannoitteen tai niiden raaka-aineena käytettävän tuhkan laatuvaatimusten perusteella. Laatuvaatimukset on esitetty aiemmin tässä työssä kappaleessa 6.4 Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Kemiallisten analyysitulosten mukaan kattilatuhka täytti kaikki lannoiteasetuksen laatuvaatimukset metsälannoitteelle lukuun ottamatta 27.10-15.11.2020 väliseltä ajalta saatua analyysitulosta (Liite 3 Taulukko 2). Kyseiset kemialliset analyysitulokset osoittivat, että kattilatuhkan sisältämän arseenin pitoisuus ylitti määritetyn raja-arvon. Myöhemmin kokeellisen tutkimuksen aikana otetuista tuhkanäytteistä saadut kemialliset analyysitulokset ovat osoittaneet, että kattilatuhka täyttää lannoiteasetuksen laatuvaatimukset ja on hyötykäytettävissä metsälannoitteena tai sen raaka-aineena. Akkreditoidun laboratorion ja tutkimuslaboratorion kemiallisissa analyysituloksissa myös kattilatuhkan osalta oli merkittävää vaihtelua (Liite 3 Taulukko 2 & Liite 4 Taulukko 1). Alla olevaan Kuvaan 18 on koottu analyysituloksen elohopeapitoisuuksien osalta. Kuvasta nähdään, että tutkimuslaboratorion 1 kemiallisten analyysitulosten perusteella elohopean pitoisuus ylittää lannoiteasetuksen laatuvaatimukset. Kuitenkin arvioitaessa kattilatuhkan lannoiteasetuksen laatuvaatimusten toteutumista, on akkreditoidusta laboratoriosta saaduilla kemiallisilla analyysituloksilla ainoastaan painoarvoa, kuten kappaleessa 4.2 Pohjatuhkan tulosten analysointi todettiin.

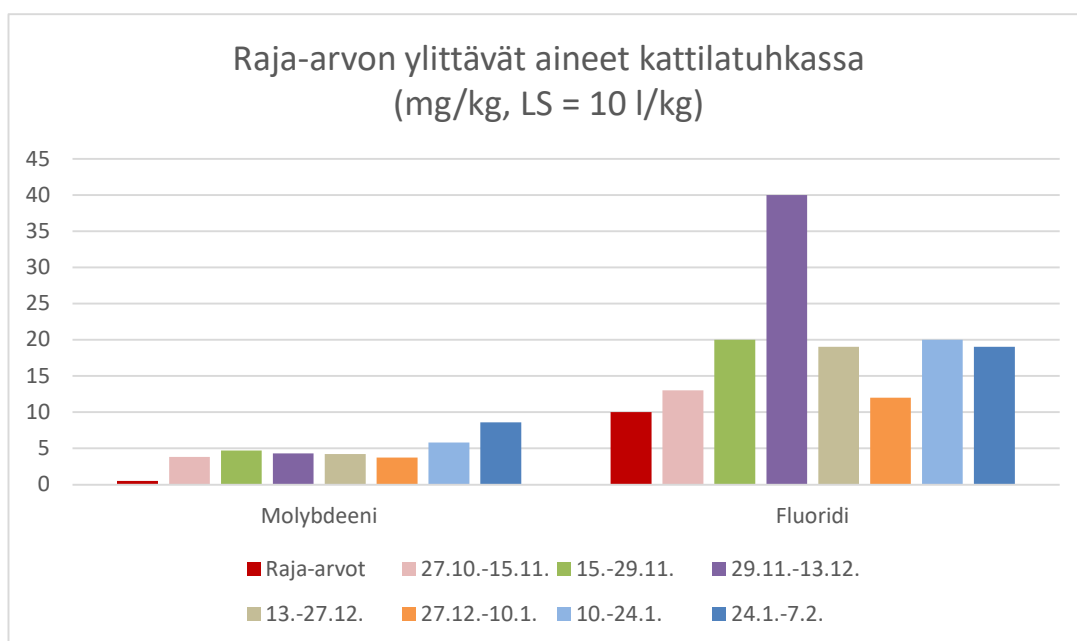


Kuva 18. Kattilatuhkan sisältämän elohopean pitoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemiaalliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratorion ja tutkimuslaboratorion 1. Kattilatuhkan sisältämän elohopean pitoisuudet eroavat huomattavasti laboratorion kemiallisten analyysitulosten perusteella.

Kattilatuhkan koostumusta tarkasteltiin kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2013) liitteessä 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset) määritettyjen kelpoisuusvaatimusten perusteella, jotka ovat tämän työn Liitteenä 2. Kelpoisuusvaatimukset on määritetty pysyvän jätteen, tavanomaisen jätteen ja vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Kemiaallisten analyysitulosten mukaan pysyvän jätteen kaatopaikalle määritetyt kelpoisuusvaatimukset ylittyvät kattilatuhkassa useamman aineen kohdalla (Liite 3 Taulukko 3). Raja-arvon ylittävät aineet kattilatuhkassa on esitetty Kuvissa 19 ja 20. Kaikissa kattilatuhkanäytteissä kloridin, sulfaatin, liuenneiden aineiden kokonaismäärän (TDS), molybdeenin ja fluoridin pitoisuudet ylittävät raja-arvot. Lisäksi kemiallisten analyysitulosten mukaan muutamissa kattilatuhkanäytteissä myös arseenin, kromin ja seleenin pitoisuudet ylittivät määrättyt raja-arvot.



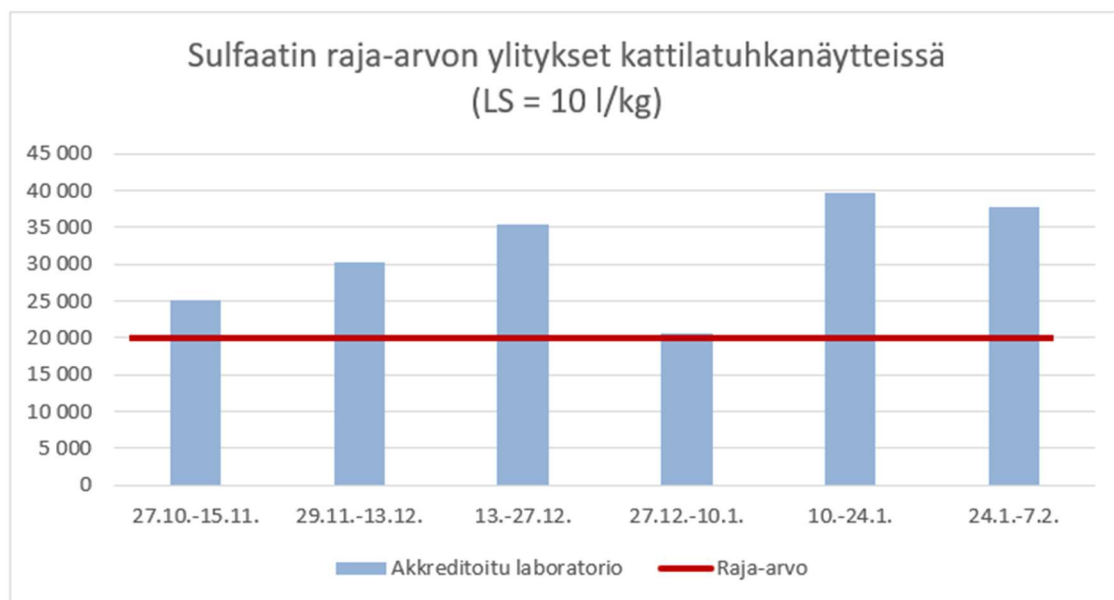
Kuva 19. Kaatopaikka-asetuksessa pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen raja-arvojen ylittävät aineet (Cl^- , SO_4^{2-} , TDS) kattilatuhkassa. Kattilatuhkan kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021.



Kuva 20. Kaatopaikka-asetuksessa pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen raja-arvojen ylittävät aineet (Mo, F) kattilatuhkassa. Kattilatuhkan kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021.

Kemiallisten analyysitulosten perusteella tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritetyt kelpoisuusvaatimukset täyttyvät kattilatuhkan osalta lukuun ottamatta sulfaatin pitoisuutta (Liite 3 Taulukko 4). Alla olevassa Kuvassa 21 on esitetty sulfaattipitoisuuden raja-arvon ylitykset kattilatuhkanäytteissä. Kemiallisten analyysitulosten mukaan muut kattilatuhkan sisältämät aineet täyttävät kelpoisuusvaatimukset. Kaatopaikka-asetuksen

(VNa 331/2.5.2013) mukaan lupaviranomainen voi mahdollisesti korottaa tiettyjä raja-arvoja tapauskohtaisesti huomioiden kaatopaikan ja sen ympäristön ominaisuudet. Tämän myötä kattilatuhkan sijoittaminen tavanomaisen jätteen kaatopaikalle voi olla mahdollista.



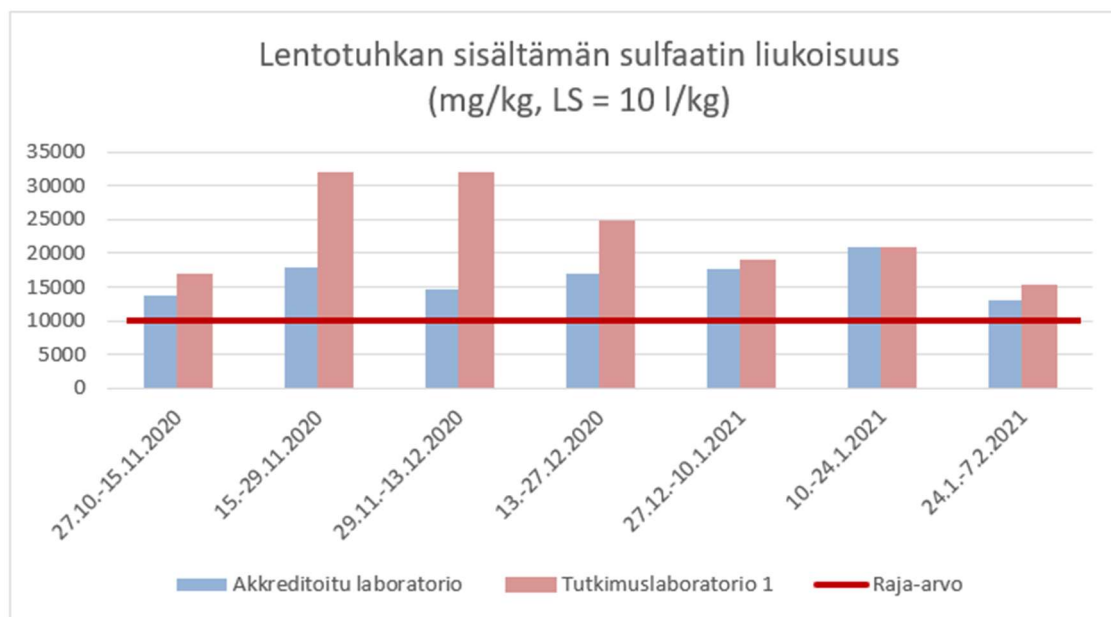
Kuva 21. Kattilatuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemiaalliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta. Kaatopaikka-asetuksessa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritetyn raja-arvon ylitys sulfaatin liukoisuuden osalta kattilatuhkanäytteissä.

Vaarallisen jätteen kaatopaikalle määritetyt kelpoisuusvaatimukset täyttyvät kattilatuhkassa kemiallisten analyysitulosten perusteella (Liite 3 Taulukko 5). Tämän seurauksena kattilatuhka tulisi loppusijoittaa vaarallisen jätteen kaatopaikalle, mikäli sitä ei voida hyötykäyttää tai sulfaattipitoisuuden raja-arvoa korottaa. Kattilatuhkan loppusijoittaminen ei ole kannattavaa, koska se olisi hyvin kallista. Erityisesti siitä syystä, että kattilatuhkaa muodostuu biovoimalaitoksella todella paljon. Kokeellisen tutkimuksen aikana muodostuneen kattilatuhkan osuus oli suurin, noin 53 %.

7.4 Lentotuhkan analyysitulosten tarkastelu

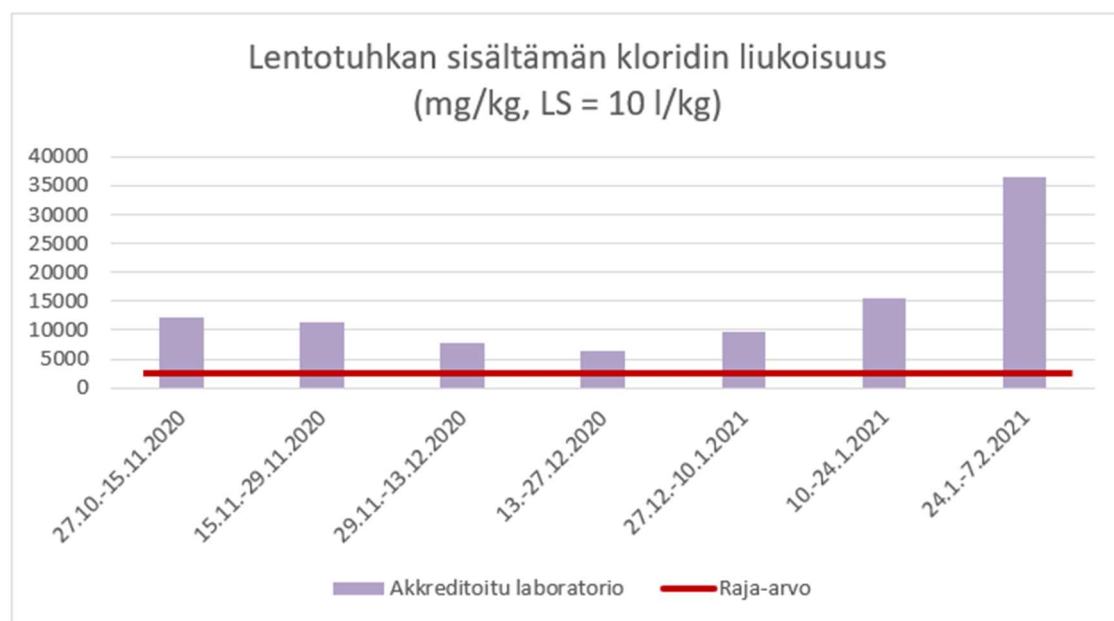
Lentotuhkan koostumusta tarkasteltiin MARA-asetuksen (VNa 843/2017) yleisen käyttökohteen eli päällystetyn kenttärakenteen laatuvaatimusten perusteella. Saatuja laboratorioanalyysituloksia verrattiin MARA-asetuksen liitteen 2 määrittämiin laatuvaatimuksiin. Kokeellisen tutkimuksen aikana 27.10.2020 - 7.2.2021 lentotuhka ei

täyttänyt kaikkia MARA-asetuksen laatuvaatimuksia päällystetyille kenttärakenteelle. Lentotuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus ylitti MARA-asetuksen määrittämät raja-arvot akkreditoitun laboratorion ja tutkimuslaboratorio 1:n kemiallisten analyysitulosten perusteella (Liite 3 Taulukko 1 & Liite 4 Taulukko 1). Jonkin verran tuloksissa oli eroavaisuuksia akkreditoitun ja tutkimuslaboratorion 1 antamien kemiallisten analyysitulosten välillä, jotka todennäköisesti johtuivat erilaisista analyysimenetelmistä. Tulokset sulfaatin liukoisuuden osalta on koottu alla olevaan Kuvaan 22.



Kuva 22. Lentotuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoitusta laboratorion ja tutkimuslaboratorion 1. Lentotuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus ylittää MARA-asetuksen määrittämän sulfaatin liukoisuuden raja-arvon.

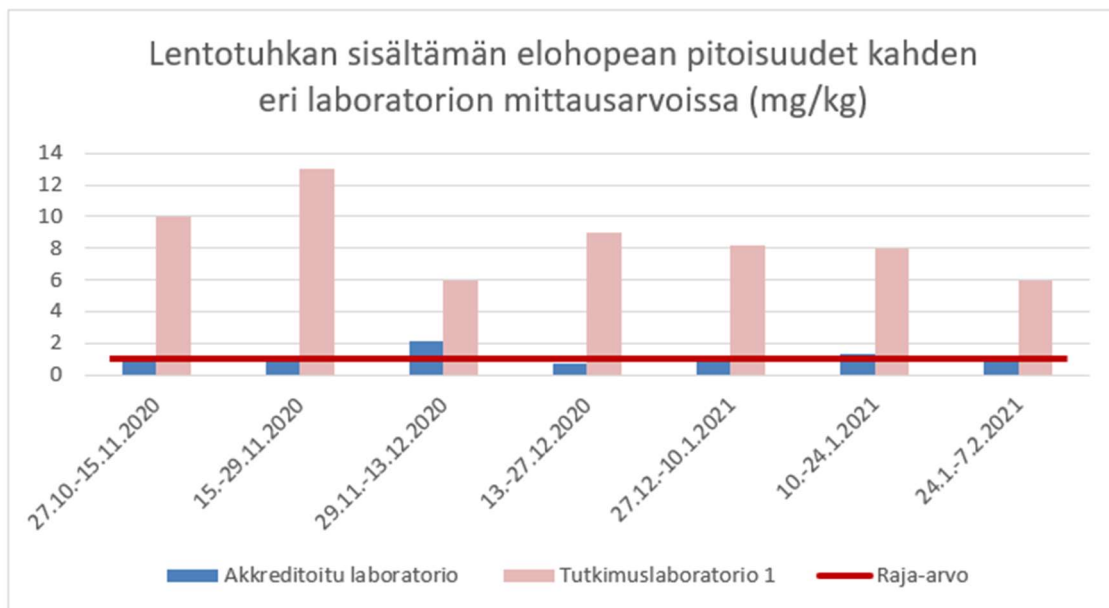
Lentotuhkan sisältämän kloridin liukoisuus ylitti myös MARA-asetuksen määrittämän raja-arvon (Liite 3 Taulukko 1). Alla olevaan Kuvaan 23 on koottu akkreditoitusta laboratorion saadut kemialliset analyysitulokset lentotuhkan sisältämän kloridin liukoisuuden osalta.



Kuva 23. Lentotuhkan sisältämän sulfaatin liukoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemiaalliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta. Lentotuhkan sisältämän kloridin liukoisuus ylittää MARA-asetuksessa määritetyn kloridin liukoisuuden raja-arvon.

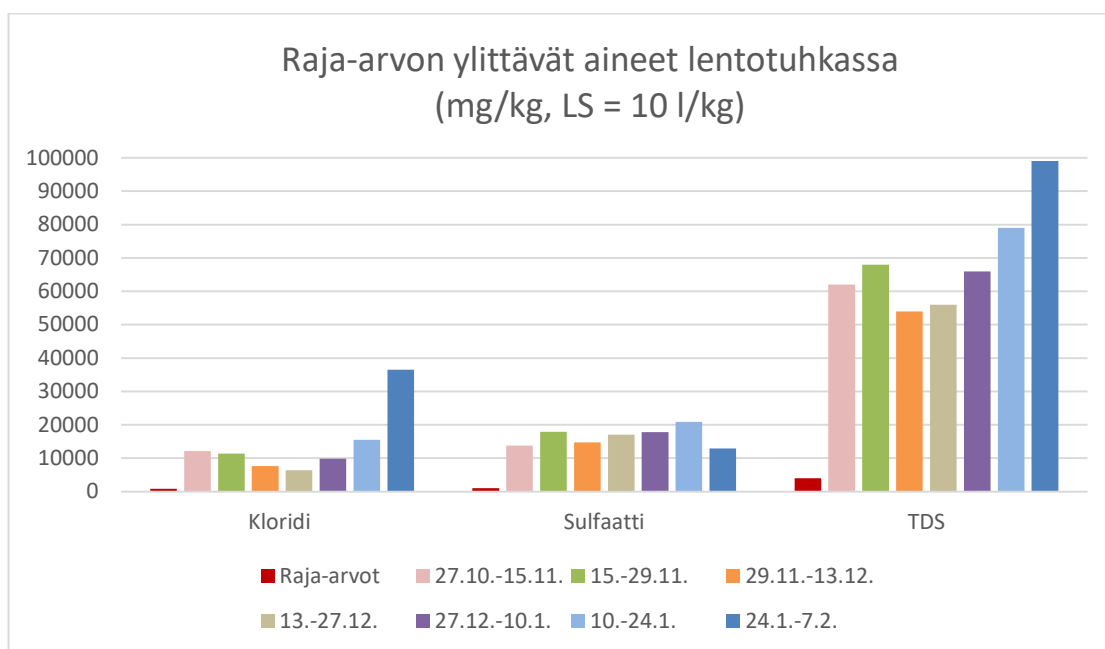
Lentotuhkan koostumusta tarkasteltiin lannoiteasetuksen (MMM 24/11) metsätuhalannoitteen tai niiden raaka-aineena käytettävän tuhkan laatuvaatimusten perusteella. Laatuvaatimukset on esitetty aiemmin tässä työssä kappaleessa 6.4 Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. Kemiaallisten analyysitulosten mukaan lentotuhka täytti kaikki lannoiteasetuksen laatuvaatimukset metsälannoitteelle lukuun ottamatta 29.11-13.12.2020 väliseltä ajalta saatua kemiaallista analyysitulosta (Liite 3 Taulukko 2). Kyseisellä aikavälillä lentotuhkan sisältämän elohopean pitoisuus ylitti lannoiteasetuksessa määritetyn enimmäispitoisuuden. Kuitenkin muiden kemiaallisten analyysitulosten perusteella lentotuhka täyttää lannoiteasetuksen määrittämät laatuvaatimukset, joten lentotuhka on hyötykäytettävissä metsätuhalannoitteena tai sen raaka-aineena. Myös lentotuhkan osalta akkreditoidusta laboratoriosta ja tutkimuslaboratoriosta saatujen kemiaallisten analyysitulosten välillä oli suhteellisen paljon eroavaisuuksia (Liite 3 Taulukko 2 & Liite 4 Taulukko 1). Alla olevaan Kuvaan 24 on koottu analyysitulokset elohopeapitoisuuksien osalta. Jälleen kuvan perusteella voidaan todeta, että tutkimuslaboratorion kemiaalliset analyysitulokset antavat elohopean pitoisuuksille merkittävästi suuremmat arvot, jotka ylittävät lannoiteasetuksen laatuvaatimukset. Ainoastaan akkreditoidusta laboratoriosta saaduilla kemiaallisilla analyysituloksilla on painoarvoa, kun arvioidaan lentotuhkan

lannoiteasetuksen laatuvaatimusten toteutumista, kuten aiemmin tämän työn kappaleissa 8.2 ja 8.3 on todettu.

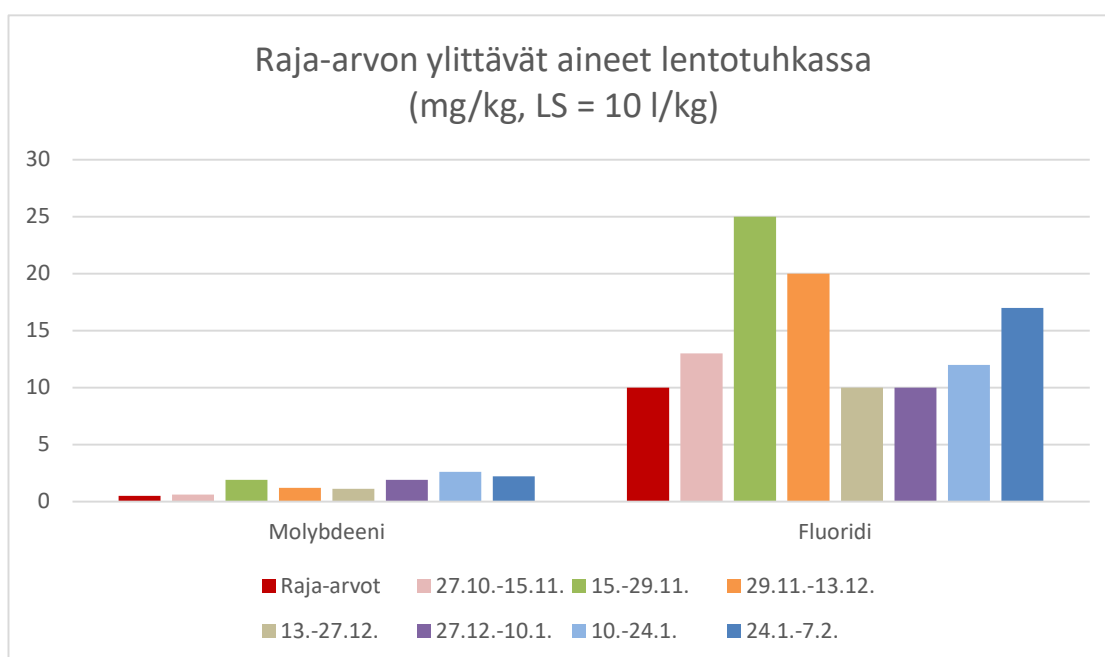


Kuva 24. Lentotuhkan sisältämän elohopean pitoisuus aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021. Kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratorion ja tutkimuslaboratoriosta 1. Lentotuhkan sisältämän elohopean pitoisuuserot laboratorion kemiallisissa analyysituloksissa.

Lentotuhkan koostumusta tarkasteltiin kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2013) liitteessä 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset) määritettyjen kelpoisuusvaatimusten perusteella, jotka ovat tämän työn Liitteenä 2. Kelpoisuusvaatimukset on määritetty pysyvän jätteen, tavanomaisen jätteen ja vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Kemiallisten analyysitulosten perusteella lentotuhka ei täytä kaikkia pysyvän jätteen kaatopaikalle laadittuja kelpoisuusvaatimuksia (Liite 3 Taulukko 3). Alla oleviin Kuviin 25 ja 26 on koottu lentotuhkan sisältämien raja-arvon ylittävien aineiden tiedot. Jokaisen tuhkanäytteen kemiallisen analyysituloksen perusteella kloridi-, sulfaatti-, molybdeeni-, fluoridi- ja TDS-pitoisuudet ylittivät kaatopaikka-asetuksen määrittämät kelpoisuusvaatimukset. Edellä mainittujen lisäksi myös arseenin ja kromin pitoisuudet ylittivät raja-arvot kahden tuhkanäytteen kemiallisen analyysituloksen perusteella.



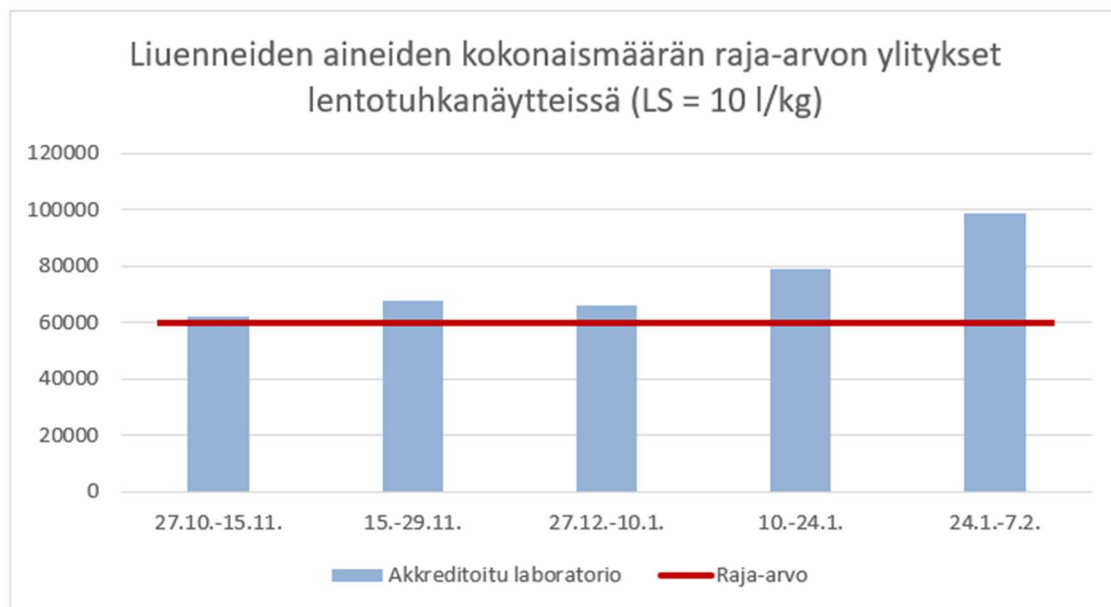
Kuva 25. Kaatopaikka-asetuksessa pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen raja-arvojen ylittävät aineet (Cl^- , SO_4^{2-} , TDS) lentotuhkassa. Lentotuhkan kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021.



Kuva 26. Kaatopaikka-asetuksessa pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen raja-arvojen ylittävät aineet (Mo, F⁻) lentotuhkassa. Lentotuhkan kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021.

Kemiallisten analyysitulosten perusteella tavanomaisen jätteen kaatopaikalle asetetut kelpoisuusvaatimukset täyttyvät lentotuhkassa lukuun ottamatta liuenneiden aineiden kokonaismäärää (Liite 3 Taulukko 4). Alla olevaan Kuvaan 27 on koottu liuenneiden aineiden kokonaismäärän ylitykset lentotuhkassa. Kemiallisten analyysitulosten perusteella muut lentotuhkan sisältämät aineet/muuttujat täyttävät

kelpoisuusvaatimukset. Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) mukaan lupaviranomainen voi mahdollisesti korottaa tiettyjä raja-arvoja tapauskohtaisesti huomioiden kaatopaikan ja sen ympäristön ominaisuudet. Tämän myötä kattilatuhkan sijoittaminen tavanomaisen jätteen kaatopaikalle voi olla mahdollista.



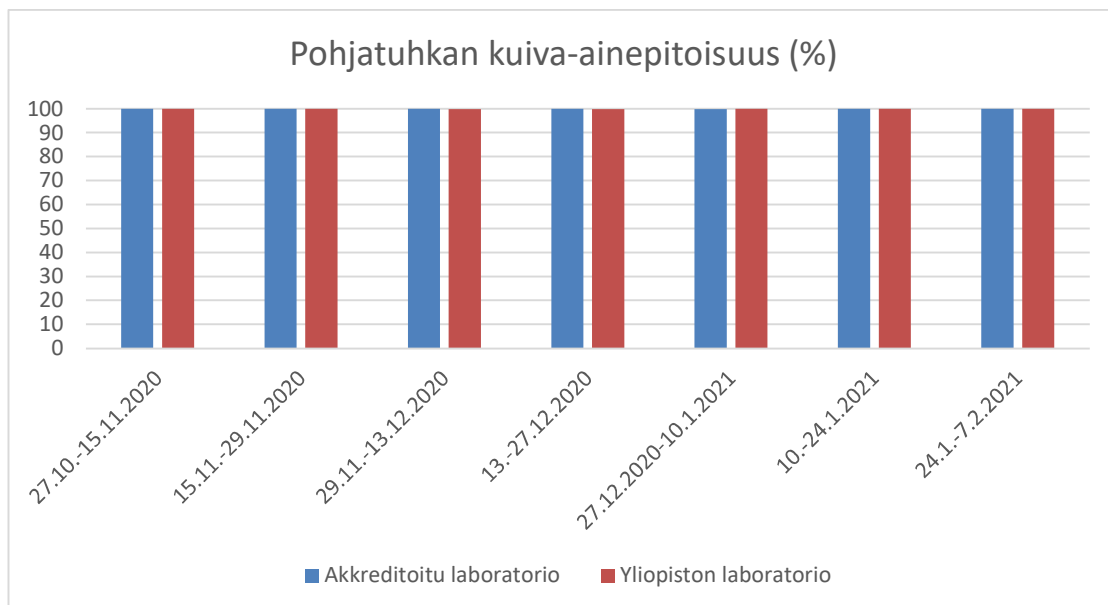
Kuva 27. Kaatopaikka-asetuksessa tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritetyn raja-arvon ylitys liuenneiden aineiden kokonaismäärän osalta lentotuhkanäytteissä. Lentotuhkan kemialliset analyysitulokset saatu akkreditoidusta laboratoriosta aikavälillä 27.10.2020-7.2.2021.

Kemiallisten analyysitulosten perusteella vaarallisen jätteen kaatopaikalle asetetut kelpoisuusvaatimukset täyttyvät jokaisen lentotuhkan sisältämän aineen osalta (Liite 3 Taulukko 5). Tämän perusteella lentotuhka tulisi sijoittaa vaarallisen jätteen kaatopaikalle, mikäli liuenneiden aineiden kokonaismäärää ei voida korottaa tai lentotuhkaa ei voida muuten hyötykäyttää. Tässäkään tapauksessa lentotuhkan loppusijoittaminen ei ole kovin kannattavaa, sillä siitä koituu kustannuksia. Lentotuhkan osuus Laanilan biovoimalaitoksella muodostuvista tuhkatuotteista on kuitenkin pienin, noin 17 %, joten lentotuhkan loppusijoittaminen olisi kattilatuhkan loppusijoittamiseen verrattuna edullisempaa.

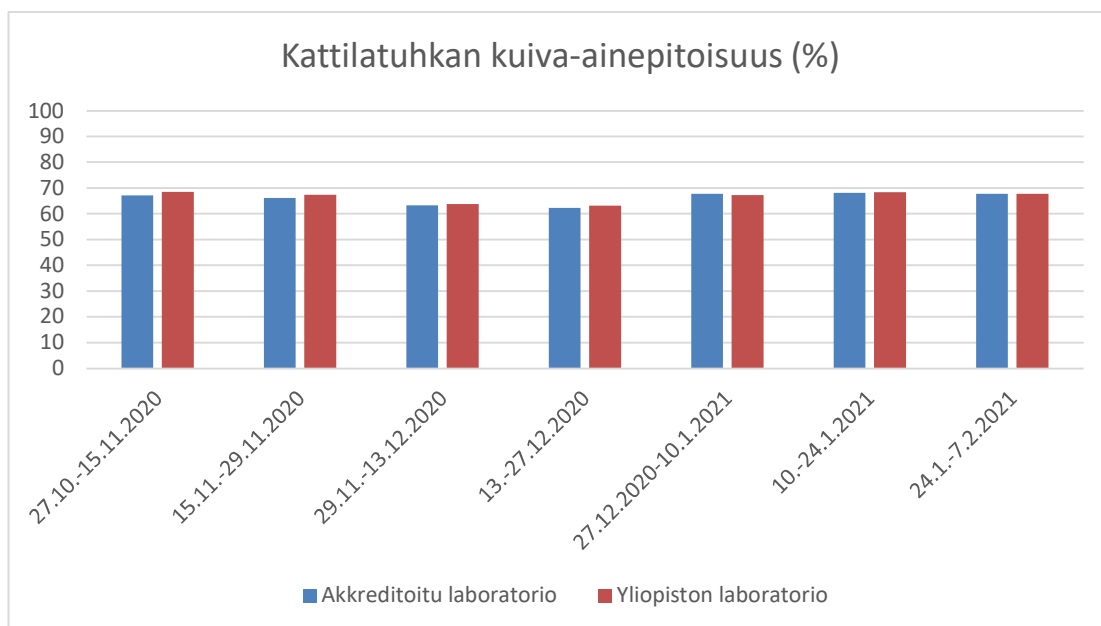
7.5 Kuiva-ainepitoisuusanalyysin tulosten analysointi

Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriossa (tutkimuslaboratorio 2) suoritettua kuiva-ainepitoisuusanalyysin tuloksia verrattiin akkreditoidusta laboratoriosta saatuihin tuloksiin (Liite 5 Taulukko 1 & Liite 6 Taulukko 1). Tulokset taulukoitiin, jotta voidaan

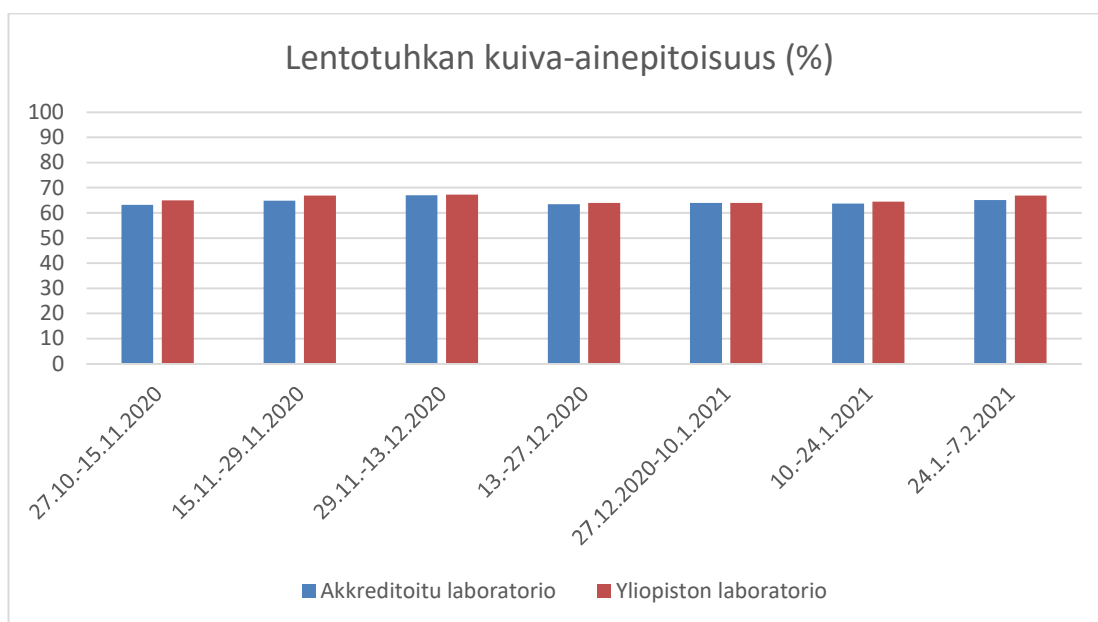
todeta tulosten yhteneväisyys ja luotettavuus. Alla oleviin Taulukoihin 28, 29 ja 30 on koottu jokaisen tuhkatuotteen tulokset.



Kuva 28. Pohjatuhan kuiva-ainepitoisuusanalyysin tulokset aikavälillä 27.10.2020 - 7.2.2021.



Kuva 29. Kattilatuhan kuiva-ainepitoisuusanalyysin tulokset aikavälillä 27.10.2020 - 7.2.2021.

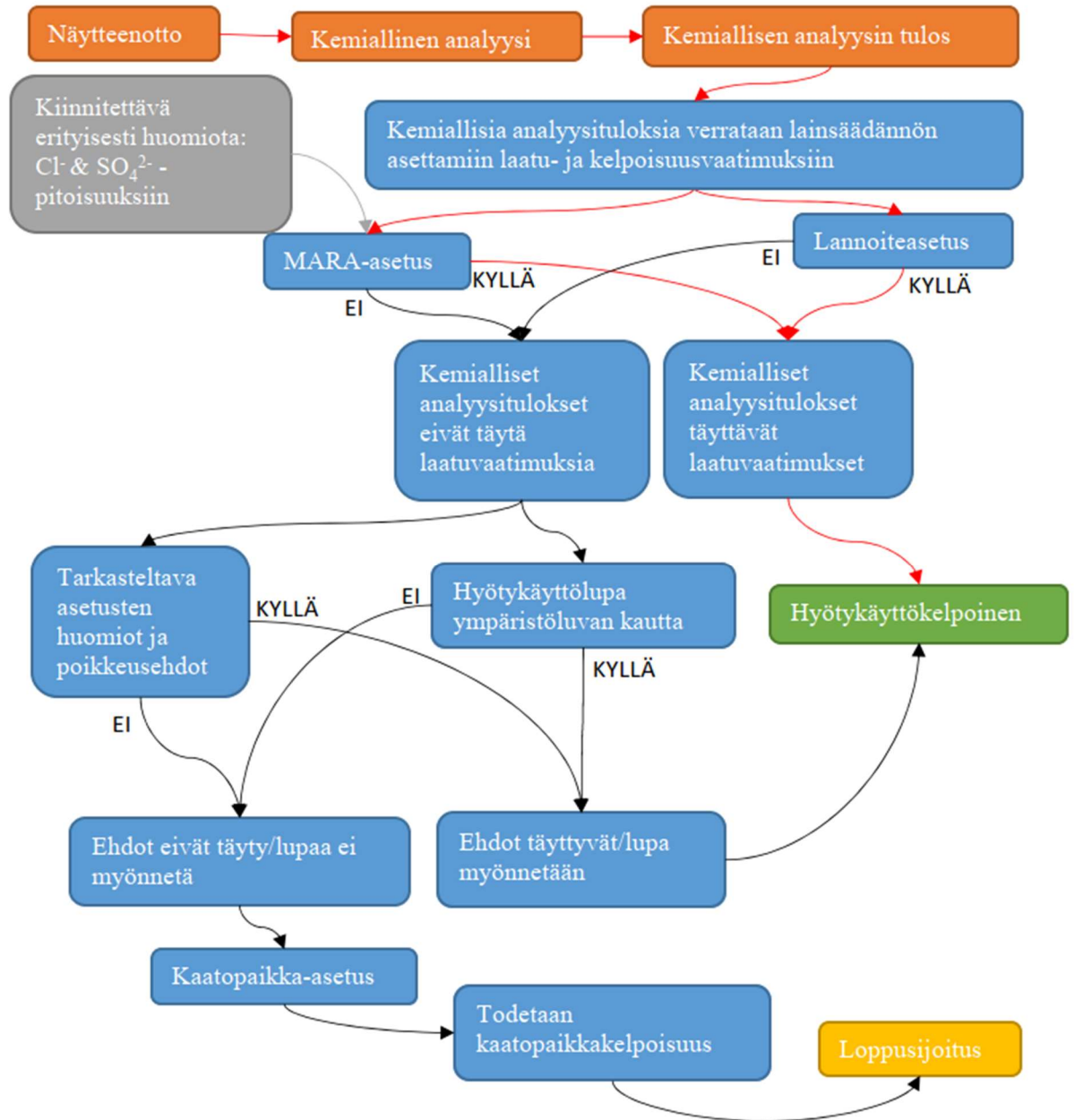


Kuva 30. Lentotuhkan kuiva-ainepitoisuusanalyysin tulokset aikavälillä 27.10.2020 - 7.2.2021.

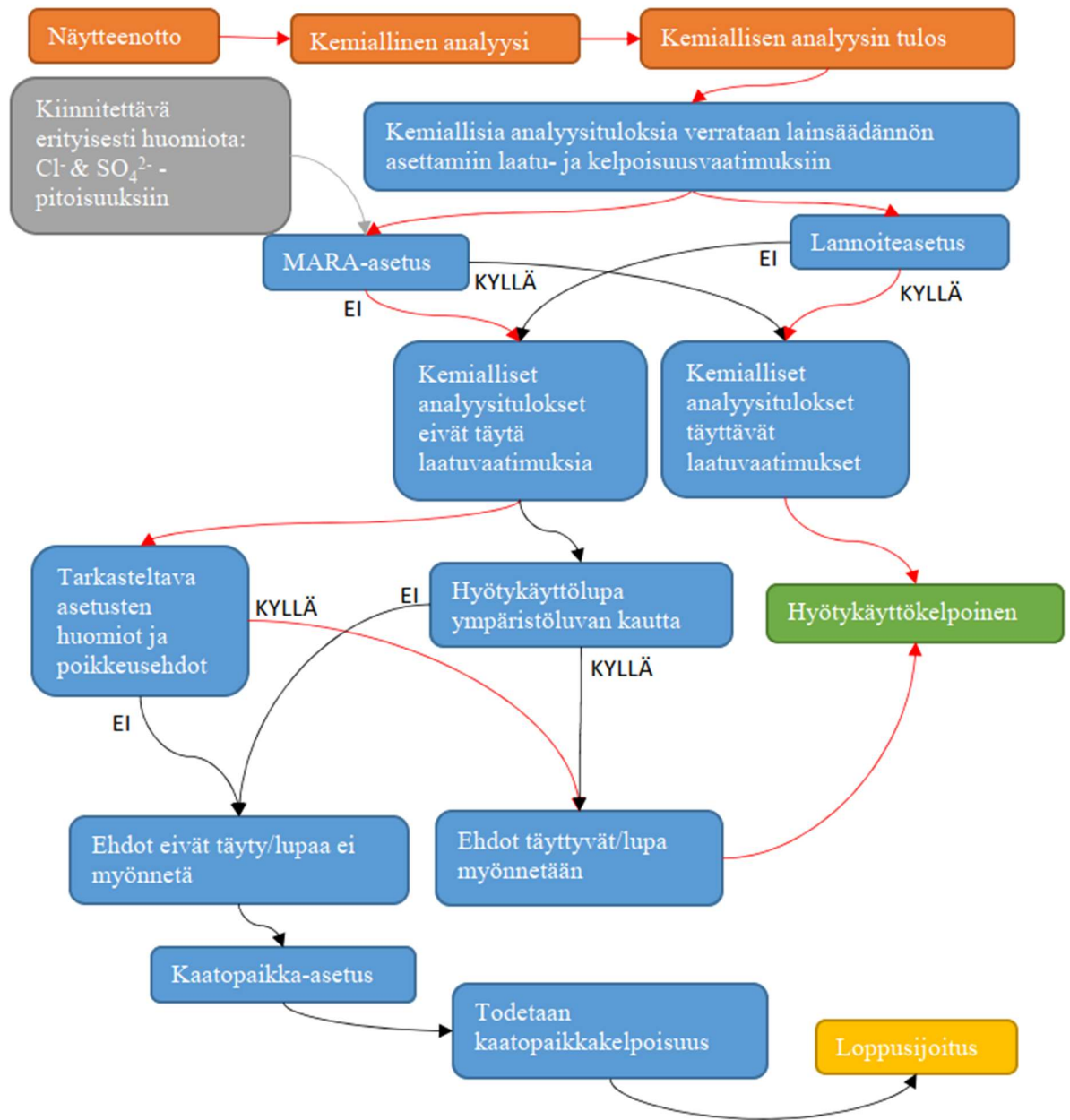
Taulukoiden perusteella voidaan nähdä, että saadut tulokset ovat yhdenmukaisia, joten tulosten voidaan todeta olevan luotettavia. Näytteenottosuunnitelmassa on esitelty, että tuhkatuotteiden osanäytteet otetaan kuivasta pohjatuhkasta ja määstä lento- ja kattilatuhkasta. Saatujen tulosten perusteella voidaan havaita, miten tuhkatuotteiden erilaiset keruuprosessit vaikuttavat kuiva-ainepitoisuuksiin. Tuloksista nähdään, että erityisesti pohjatuhkan kuiva-ainepitoisuus on lähes 100 % jokaisen tuhkanäytteen analyysituloksen perusteella. Tämä johtuu siitä, että pohjatuhka kerätään biovoimalaitoksella kuivana kontteihin, joista tuhkanäytteet on otettu. Kattila- ja lentotuhkan keruuprosessit eroavat biovoimalaitoksella siten, että ne puretaan suoraan kuorma-autonlavalle, jolloin tuhkaan lisätään vettä pölyämisen estämiseksi. Tästä syystä sekä kattila- että lentotuhkan kuiva-ainepitoisuus on ollut analyysitulosten mukaan 60–70 % välillä.

7.6 Monipolttoainetuhkan hyötykäyttömahdollisuudet

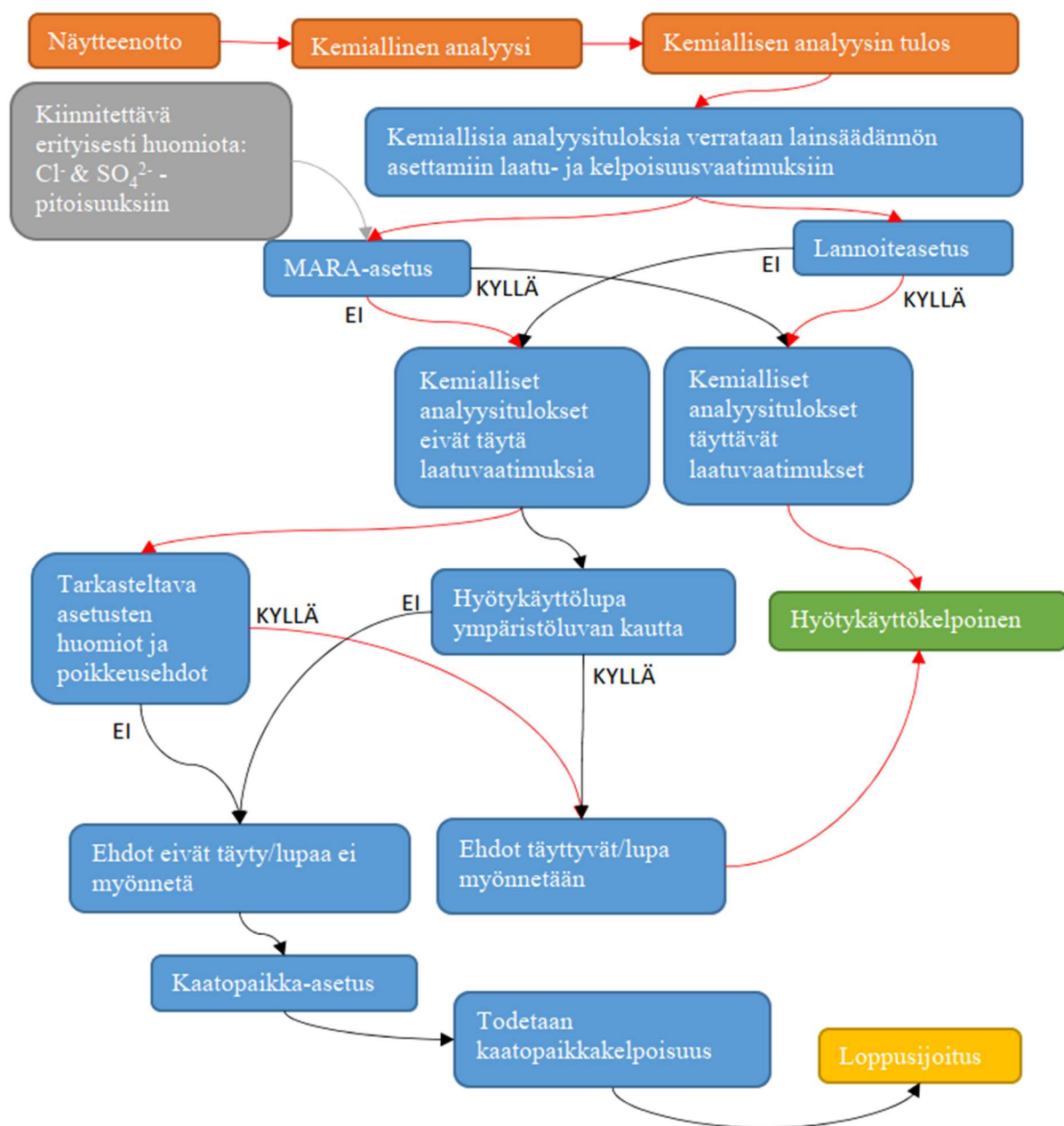
Alla oleviin Kuviin 31, 32 ja 33 on koottu Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkan hyötykäyttökaaviot. Kaavioissa on esitetty, kuinka biovoimalaitoksen tuhkatuotteiden hyötykäyttöä tarkastellaan lainsäädännön perusteella. Lisäksi kaavioissa on punaisilla nuolilla esitetty tämän työn tutkimustulosten perusteella, kuinka tuhkatuotteiden hyötykäyttömahdollisuuksien tarkastelu on edennyt laboratoriosta saatujen kemiallisten analyysitulosten jälkeen.



Kuva 31. Pohjatuhkan hyötykäyttökaavio. Punaiset nuolet kuvaavat pohjatuhkan hyötykäyttöpolkua työn tutkimustulosten perusteella.



Kuva 32. Kattilatuhan hyötykäyttökaavio. Punaiset nuolet kuvaavat kattilatuhan hyötykäyttöpolkua työn tutkimustulosten perusteella.



Kuva 33. Lentotuhkan hyötykäyttökaavio. Punaiset nuolet kuvaavat lentotuhkan hyötykäyttöpolkua työn tutkimustulosten perusteella.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Monipolttoainetuhkan hyötykäyttökelpoisuus perustuu lainsäädännössä asetettuihin laatu- ja kelpoisuusvaatimuksiin. Tuhkan hyötykäyttökelpoisuutta on myös mahdollista arvioida tapauskohtaisesti niissäkin tapauksissa, joissa tuhka ei suoraan täytä lainsäädännön asettamia laatuvaatimuksia. Lainsäädännön perusteella tiettyjä raja-arvoja voidaan korottaa tai mahdollisesti hyötykäyttölupaa voidaan hakea ympäristöluvan kautta.

Kokeellisen tutkimuksen aikana saatujen kemiallisten analyysitulosten perusteella voidaan todeta, että Laanilan biovoimalaitoksen monipolttoainetuhkaa on mahdollista hyötykäyttää. Pohjatuhka osoittautui hyötykäyttökelpoiseksi kemiallisten analyysitulosten perusteella täyttäen suoraan MARA-asetuksen päällystetyn kenttärakenteen laatuvaatimukset. Kemiallisten analyysitulosten perusteella kattila- ja lentotuhka eivät täyttäneet kaikkia MARA-asetuksen asettamia laatuvaatimuksia päällystetylle kenttärakenteelle. Kuitenkin kattila- ja lentotuhkaa voisi olla mahdollista hyötykäyttää MARA-asetuksen mukaisesti päällystettyyn kenttärakenteeseen alueilla, joissa maaperän sulfaattipitoisuus on normaalia korkeampi. Lisäksi Laanilan biovoimalaitoksen tuhkatuotteet ovat hyötykäyttökelpoisia, kun hyötykäyttökohde täyttää MARA-asetuksen (VNa 843/2017) poikkeuksessa mainitut ehdot, jolloin MARA-asetuksen asettamia raja-arvoja kloridin, sulfaatin ja fluoridin liukoisuuksille ei sovelleta.

Tuhkanäytteiden kemiallisia analyysituloksia verrattaessa lannoiteasetuksen määrittämiin enimmäispitoisuusrajoihin voidaan todeta, että tuhkatuotteet ovat hyötykäyttökelpoisia akkreditoidun laboratorion kemiallisten analyysitulosten perusteella lukuun ottamatta muutamia pistemäisiä raja-arvoylityksiä. Pistemäiset raja-arvoylitykset tapahtuivat elohopean ja arseenin osalta lento- ja kattilatuhkassa. Pohjatuhkan osalta raja-arvoylityksiä ei tapahtunut lannoiteasetuksen perusteella lainkaan, joten pohjatuhkaa on mahdollista hyötykäyttää myös metsälannoitteena tai sen raaka-aineena.

Kemiallisten analyysitulosten perusteella Laanilan biovoimalaitoksen tuhkaa ei ole tarpeellista loppusijoittaa kaatopaikalle, sillä tuhkatuotteita on mahdollista hyötykäyttää. Kustannussyistä tuhkien loppusijoittaminen ei ole kannattavaa, etenkin tässä tapauksessa, kun tuhkatuotteita muodostuu arvioiden mukaan vuodessa noin 15 000

tonnia. Kokeellisen tutkimuksen aikana 27.10.2020 - 7.2.2021 tuhkatuotteita muodostui yhteensä noin 7 800 t.

Polttoainejakauman vaihtelut osaltaan vaikuttivat muodostuviin tuhkatuotteisiin ja niiden koostumukseen. Kemiallisten analyysitulosten mukaan kloridin ja sulfaatin liukoisuudet ylittivät MARA-asetuksessa määritetyt raja-arvot kokeellisen tutkimuksen aikana. Kloridin liukoisuuden raja-arvo MARA-asetuksen (VNa 843/2017) päällystetylle kenttärakenteelle on 2 400 milligrammaa kilossa (mg/kg) ja sulfaatin liukoisuuden raja-arvo on 10 000 mg/kg. Kloridin ja sulfaatin liukoisuudet ylittivät raja-arvot lentotuhkan kemiallisten analyysitulosten mukaan koko kokeellisen tutkimuksen ajan. Sulfaatin liukoisuus ylittyi myös kattilatuhkassa kemiallisten analyysitulosten mukaan koko kokeellisen tutkimuksen ajan. Lisäksi kloridin liukoisuus ylittyi kattilatuhkassa muutamien kemiallisten analyysitulosten perusteella. Kloridin liukoisuuden ylitykseen vaikutti todennäköisesti polttoainejakaumassa tapahtuneet muutokset. SRF-polttoaineen osuuden ollessa suurempi, yli 4 %, kloridin liukoisuus kattilatuhkassa kasvoi ja ylitti raja-arvon kemiallisten analyysitulosten perusteella.

Saatujen kemiallisten analyysitulosten mukaan kloridin liukoisuuden raja-arvon ylitys oli pienimmillään lentotuhkassa, kun SRF-polttoaineen osuus polttoainejakaumassa oli maksimissaan 2 % ja turpeen osuus oli suuri, 47–55 %. Kuitenkin saman polttoainejakauman aikana sulfaatin liukoisuus ylitti raja-arvon kattilatuhkassa moninkertaisesti ja lentotuhkassa sulfaatin liukoisuus oli 14 000–17 000 mg/kg.

Kloridin liukoisuuden raja-arvon ylitys oli suurimmillaan kattila- ja lentotuhkassa, kun polttoainejakauman SRF-polttoaineen osuus oli 3–5 % ja biopolttoaineen osuus oli suuri, 57–59 %. Kemiallisten analyysitulosten mukaan kloridin liukoisuus lentotuhkassa oli enimmillään 15 000 mg/kg ja kattilatuhkassa 3 800 mg/kg. Tuolloin myös sulfaatin liukoisuuden raja-arvon (raja-arvo mg/kg) ylitys oli suhteellisen suuri, kemiallisten analyysitulosten perusteella sulfaatin liukoisuus lentotuhkassa oli 13 000–20 000 mg/kg välillä ja kattilatuhkassa oli 18 000–39 000 mg/kg välillä.

Edellä esitettyjen kemiallisten analyysitulosten perusteella kannattavin polttoainejakauma biovoimalaitokselle voisi olla 47 % turvetta, 52 % biopolttoainetta ja 2 % SRF-polttoainetta, sillä silloin tuhkatuotteiden sisältämien kloridin ja sulfaatin liukoisuusrajojen ylitykset ovat pienimmät. Kuitenkin Oulun Energian hiilineutraalisuustavoitteen kannalta olisi parempi valita polttoainejakaumaksi 39 %

turvetta, 57 % biopolttoainetta ja 4 % SRF-polttoainetta. Hiilineutraalisuustavoitteen lisäksi jälkimmäinen polttoainejakauma olisi parempi valinta, koska tuhkatuotteet ovat edelleen hyötykäyttökelpoisia tietyissä kohteissa, vaikka liukoisuuksien raja-arvot ylittyvät kloridin ja sulfaatin osalta.

9 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin Laanilan biovoimalaitoksella muodostuvia tuhkatuotteita, jotka ovat pohja-, kattila- ja lentotuhka. Tuhkatuotteet muodostuvat polttoaineteholtaan 215 MW biovoimalaitoksessa, joka tuottaa kaukolämpöä, prosessihöyryä ja sähköä. Ensisijaiset polttoaineet, joita biovoimalaitoksella käytetään ovat biopolttoaine, turve ja SRF-polttoaine. Muodostuvista tuhkatuotteista toteutettiin laboratorioissa kemiallisia analyysejä, joiden perusteella tuhkien koostumuksia tarkasteltiin. Työn kokeellinen tutkimus toteutettiin noin kolmen kuukauden aikana, jolloin tuhkatuotteista otettiin osanäytteitä, joista muodostettiin kahden viikon kokoomanäytteitä.

Lainsäädäntö ohjaa kehittämään tuhkien hyötykäyttöä sekä tarkastelemaan muodostuvien tuhkatuotteiden kemiallista koostumusta. Lainsäädännön perusteella tuhkien hyötykäyttöä varten on toteutettava kemiallisia analyysejä, jotta voidaan arvioida tuhkan hyötykäyttökelpoisuutta. Tuhka on hyötykäyttökelpoista, mikäli kemiallisten analyysitulosten perusteella tuhkatuotteen sisältämien aineiden pitoisuudet täyttävät lainsäädännössä asetetut laatuvaatimukset. Hyötykäyttökelpoisuutta ei kuitenkaan määritellä ainoastaan tuhkan kemiallisten analyysitulosten perusteella. Hyötykäyttöä arvioitaessa on tarkasteltava myös lainsäädännön sisältämät poikkeusehdot, joiden perusteella tuhkaa on mahdollista hyötykäyttää tietyissä kohteissa, vaikkei kemialliset analyysitulokset täyttäisikään haitta-ainepitoisuuksien raja-arvoja. Myös ympäristöluvan kautta tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksia voidaan arvioida tapauskohtaisesti.

Jäteperäisten polttoaineiden, kuten SRF-polttoaineen käyttö edistää turpeen polton vähentämistä sekä tukee luonnonvarojen kestävämpää käyttöä. Lisäksi jäteperäisten polttoaineiden avulla saadaan vähennettyä syntyvien jätteiden loppusijoitusta sekä vähennettyä neitseellisten raaka-aineiden polttoainekäyttöä. Jäteperäiset polttoaineet voivat kuitenkin tuoda myös haasteita voimalaitoksilla muodostuvien tuhkien hyötykäyttöön, sillä SRF-polttoaineen kemiallinen koostumus, kuten haitta-ainepitoisuudet, ovat erilaiset verrattuna esimerkiksi turpeen kemialliseen koostumukseen. Tuhkan koostumukseen on mahdollista vaikuttaa jo polton aikana muun muassa lisäaineiden käytöllä. Lisäaineet sitovat polton aikana tuhkan sisältämiä haitta-aineita, kuten rikkioksideja, ja muokkaavat niitä vähemmän haitalliseen muotoon. Yleisesti voimalaitoksilla polton aikana käytettävät lisäaineet ovat erilaisia

kalsiumyhdisteitä, esimerkiksi dolomiitteja, sillä niitä voidaan hyödyntää rikkinpoistomenetelmänä.

Laanilan biovoimalaitoksella muodostuvien tuhkien hyötykäyttöä tarkasteltiin pääasiassa MARA- ja lannoiteasetusten laatuvaatimusten perusteella. Lisäksi tuhkatuotteiden kaatopaikkakelpoisuudet arvoitiin. Tarkastelu perustui kemiallisiin analyysituloksiin. Kemialliset analyysitulokset osoittivat, että sulfaatin ja kloridin liukoisuudet ylittivät eniten raja-arvoja lento- ja kattilatuhkassa. Pohjatuhkan kemiallisten analyysitulosten perusteella haitta-ainepitoisuuksien raja-arvojen ylityksiä ei tapahtunut, vaan pohjatuhka täytti asetusten laatuvaatimukset suoraan. Vaikka lento- ja kattilatuhka sisälsivät haitta-ainepitoisuuksien raja-arvojen ylityksiä, voi tuhkatuotteita silti hyötykäyttää sellaisissa hyötykäyttökohteissa, jotka täyttävät MARA-asetuksen poikkeusehdot. Lisäksi tapauskohtaisesti myös ympäristölupa voi sallia lento- ja kattilatuhkan käytön tietyissä hyötykäyttökohteissa.

Tässä työssä sivuttiin kirjallisuuskatsauksessa myös hieman lisäaineiden käyttöä leijukerros poltossa. Lyhyen katsauksen perusteella dolomiitti voisi olla yksi mahdollisista lisäaineista Laanilan biovoimalaitoksen leijukerros polttoon rikinsidontakyvyn ansiosta. Laanilan biovoimalaitoksen polttoaineet, erityisesti biopolttoaine ja SRF-polttaine, muodostavat palaessaan rikkioksideja, joten rikkinpoistomenetelmä on tarpeellinen. Kuitenkin biovoimalaitoksen kannalta on oleellista tehdä jatkotutkimusta mahdollisista lisäaineista, joita kierto leijukattilassa voisi hyödyntää. Dolomiitin lisäksi tutkimusta voisi tehdä myös muiden kalkkikivien ja kalsiumyhdisteiden lisäainekäytöstä, sillä niiden rikinsidontakyky vaihtelee.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella vahvistettiin pohjatietoja tuhkan muodostumisesta ja tuhkan hyötykäyttölainsäädännöstä, joiden mukaan kemiallisia analyysituloksia on käsitelty. Tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset vastaavat kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia. Lisäksi tässä työssä kemiallisten analyysitulosten luotettavuus varmistettiin käyttämällä useampaa laboratoriota tuhkanäytteiden analysoimiseen. Saatujen kemiallisten analyysitulosten perusteella tulokset ovat yhdenmukaisia. Kuitenkin eroja kemiallisissa analyysituloksissa on havaittavissa laboratorioiden erilaisten analyysimenetelmien myötä, kuten voi olettaa olevan. Biovoimalaitoksen tuhkatuotteiden kemiallista analysoimista on tarpeellista jatkaa myös tämän työn jälkeen, jotta voidaan varmistaa tuhkien soveltuvuus hyötykäyttöön tulevaisuudessakin. Lisäksi

tutkimusta tuhkatuotteiden koostumuksesta on kannattavaa tehdä etenkin silloin, kun polttoainejakaumassa tapahtuu muutoksia. Erityisen tärkeää monipolttoainetuhkien koostumusten kannalta on tehdä tutkimusta SRF-polttoaineen osuuden kasvaessa polttoainejakaumassa.

10 LÄHDELUETTELO

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J., Korhonen J., 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [verkkodokumentti]. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf> [viitattu: 23.9.2020]. 263 s.

Aluehallintovirasto, 2017. Ympäristöluvat, Lupapäätös nro 144/2017/1, Dnro PSAVI/422/2017. Laanilan yhteistuotantovoimalaitoksen ympäristö- ja vesitalouslupa, Oulu. [viitattu: 21.9.2020].

Bezner, 2020. Jätteiden lajittelulaitoksen layout, isometric 2020-01-27. Saksa: Bezner, Heilig Group.

Buhre B., Hinkley J., Gupta R., Nelson P., Wall T., 2006. Fine ash formation during combustion of pulverized coal-coal property impacts. Fuel, 85 (2): 185–193.

Dahlbom R., 2018. Oulun Energia, Jätteen lajittelulaitos, Projektin yleiskuvaus. Espoo: ÅF-Consult Ltd.

Deng Y., Ansart R., Baeyens J., Zhang H., 2019. Flue Gas Desulphurization in Circulating Fluidized Beds. Energies, 12 (20): 3908.

European Chemicals Agency, 2020. ECHA, Lainsäädäntö, REACH [verkkodokumentti]. Helsinki: European Chemicals Agency. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach> [viitattu: 29.10.2020].

Gregow H., Lehtonen I., Pirinen P., Venäläinen A., Vajda A., Koskiniemi J., 2019. Preparing for peat production seasons in Finland and experimenting with long range impact forecasting. Climate Services, 14: 37–50.

Hadzic M., 2018. Happamat sulfaattimaat ja niiden tunnistaminen [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus SYKE, Vesistökunnostusverkoston vuosiseminaari 2018. [viitattu 27.1.2021].

Iacovidou R., Hahladakis J., Deans I., Velis C., Purnell P., 2018. Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal: Impact on multi-dimensional resource recovery value. *Waste Management*, 73: 535-545.

Ivell D., 2012. The Use of Bag Filters in a DAP Plant. *Procedia Engineering*, 46: 83–88.

L 646/17.6.2011. Jätelaki [viitattu 21.9.2020].

L 1126/17.12.2010. Jäteverolaki [viitattu 28.10.2020].

L 539/29.6.2006. Lannoitevalmistelaki [viitattu 23.10.2020].

Laine-Ylijoki J., Syrjä J.-J., Wahlström M., 2003. Röntgenfluoresenssi menetelmät kierrätyspolttoaineiden pikalaadunvalvonnassa [verkkodokumentti]. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2215.pdf> [viitattu: 25.2.2021] 51 s.

Leckner B., 1998. Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 24 (1): 31-61.

Lehtomäki J. & Dahlbom R., 2017. Oulun Energia, WOEWTPF-334, Material flow report. Espoo: ÅF Energy Consulting.

MMMa 24/11. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista [viitattu 26.10.].

Ma X., Lv H., Yang L., Zhang Z., Sun Z., Wu H., 2020. Removal characteristics of organic pollutants by the adsorbent injection coupled with bag filtering. *Journal of Hazardous Materials*, available online 13 October 2020, 124193.

Nasrullah M., Hurme M., Oinas P., Hannula J., Vainikka P., 2017. Influence of input waste feedstock on solid recovered fuel production in a mechanical treatment plant. *Fuel Processing Technology*, 163: 35–44.

Ohenoja K., Körkkö M., Wigren V., Österbacka J., Illikainen M., 2017. Fly ash classification efficiency of electrostatic precipitators in fluidized bed combustion of peat, wood, and forest residues. *Journal of Environmental Management*, 206: 607–614.

Ojala E., 2010. Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä [verkkodokumentti]. Motiva. Energiateollisuus. Saatavissa: https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/selvitys_puu-_ja_turvetuhkan_lannoite_seka_muusta_hyotykaytosta_energiateollisuus_2010.pdf [viitattu: 7.10.2020]. 51 s.

Oulun Energia, 2020a. Oulun Energia, Tietoa Oulun Energiasta [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun Energia. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/oulu-energia-konserni/konsernin-esittely> [viitattu 16.9.2020].

Oulun Energia, 2020b. Oulun Energia, Tietoa Oulun Energiasta, Energiantuotanto [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun Energia. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/energia-ja-ymparisto/energiantuotanto> [viitattu 16.9.2020].

Oulun Energia, 2021. Oulun Energia, Tietoa Oulun Energiasta, Vastuullisuus ja ympäristö [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun Energia. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/oulu-energia/tietoa-oulu-energiasta/vastuullisuus-ja-ymparisto/oulu-energian-hiilineutraalisuuspolku-hiilineutraaliksi-2030-luvulla> [viitattu 27.1.2021].

Puisto H. & Tihinen H., 2020. Jätteiden lajittelulaitoksen pelastussuunnitelma. Oulu: Sweco & Oulun Energia Oy.

Pöyry Finland Oy, 2019 (päivittänyt Latola E., 2020). Oulun Energia Oy, Laanilan biovoimalaitos, Tarkkailusuunnitelma. Oulu: Pöyry Finland Oy & Oulun Energia Oy. [viitattu: 17.9.2020]. 43 s.

Raiko R., Kurki-Suonio I., Saastamoinen J., Hupa M., 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Ranta J. & Wahlström M., 2002. Tuhkien laatu REF-seospoltossa [verkkodokumentti]. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2002/T2138.pdf> [viitattu 7.10.2020]. 69 s.

SFS-EN 15934, 2012. Sludge, treated biowaste, soil and waste. Calculation of dry matter fraction after determination of dry residue or water content. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 21 + 9 s.

SMA Mineral Oy, 2020. Dolomiitti [verkkodokumentti]. Tornio: SMA Mineral Oy. Saatavissa: <https://smamineral.se/fi/product/dolomiitti/> [viitattu: 8.10.2020].

Szydelko A., Ferens W., Rybak W., 2020. The effect of mineral additives on the process of chlorine bonding during combustion and co-combustion of Solid Recovered Fuels. *Waste Management*, 102: 624–634.

Tihinen H., 2020a. Laanilan biovoimalaitoksen näytteenottosuunnitelma. Oulu: Oulun Energia Oy.

Tihinen H., 2020b. Laanilan biovoimalaitoksen näytteenotto-ohje tuhkan kuljettajalle. Oulu: Oulun Energia Oy.

Valmet Technologies Oy, 2020. Oulun Energia Oy / Laanilan biovoimalaitos, käyttö- ja huolto-ohjeet. [viitattu: 21.1.2021]. 456 s.

VNa 843/2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa [viitattu: 22.10.2020].

VNa 179/2012. Valtioneuvoston asetus jätteistä [viitattu 21.9.2020].

VNa 331/2.5.2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista [viitattu 27.10.2020].

YSL 527/27.6.2014. Ympäristönsuojelulaki [viitattu 15.10.2020].

Zevenhoven M., Yrjas P., Hupa M., 2010. 14 Ash-Forming Matter and Ash-Related Problems. *Handbook of Combustion, Part 4. Solid Fuels*: 493–531.

LIITELUETTELO

Liite 1. MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liite 2 (Haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerrospaksuus maarakentamiskohteessa).

Liite 2. Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) liite 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset).

Liite 3. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset akkreditoidusta laboratoriosta.

Liite 4. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset tutkimuslaboratoriosta 1.

Liite 5. Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriossa saadut analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuudelle.

Liite 6. Akkreditoidun laboratorion analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksille.

Liite 1. MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liite 2 (Haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerospaksuus maarakentamiskohteessa).

Taulukko 1. Valtioneuvoston asetuksen määrittämät raja-arvot jätteiden hyödyntämiseksi maarakentamisessa (VNa 843/2017).

Haitallinen aine	Maarakentamiskohde						
	Väylä ¹⁾		Kenttä ¹⁾		Valli	Teollisuus- ja varastorakennuksen pohjarakenne	Tuhkamursketie ²⁾
	jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		jätteen kerrospaksuus ≤ 5,0 m	jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m	jätteen kerrospaksuus ≤ 0,2 m
	Peitetty	Päällystetty	Peitetty	Päällystetty	Peitetty		
Liukoisuus (mg/kg LS = 10 l/kg)							
Antimoni (Sb)	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Arseeni (As)	1	2	0,5	1,5	0,5	2	2
Barium (Ba)	40	100	20	60	20	100	80
Kadmium (Cd)	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06
Kromi (Cr)	2	10	0,5	5	1	10	5
Kupari (Cu)	10	10	2	10	10	10	10
Lyijy (Pb)	0,5	2	0,5	2	0,5	2	1
Molybdeeni (Mo)	1,5	6	0,5	6	1	6	2
Nikkeli (Ni)	2	2	0,4	1,2	1,2	2	2
Seleen (Se)	1	1	0,4	1	1	1	1
Sinkki (Zn)	15	15	4	12	15	15	15
Vanadiini (V)	2	3	2	3	2	3	3
Elohopea (Hg)	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03

Kloridi (Cl ⁻) ³⁾	3 200	11 000	800	2 400	1 800	11 000	4 700
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻) ³⁾	5 900	18 000	1 200	10 000	3 400	18 000	6 500
Fluoridi(F ⁻) ³⁾	50	150	10	50	30	150	100
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	500	500	500	500	500	500	500
Pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)							
Bentseeni	0,2	0,2	0,02	0,2	0,06	0,02	0,2
TEX ⁴⁾	25	25	25	25	25	10	25
Naftaleeni	5	5	5	5	5	5	5
PAH-yhdisteet ⁵⁾	30	30	30	30	30	30	30
Fenoliset yhdis- teet ⁶⁾	10	10	5	10	10	10	10
PCB-yhdis- teet ⁷⁾	1	1	1	1	1	1	1
Öljyhiilivedyt C10–C40	500	500	500	500	500	300	500

Edellä olevan taulukon 1 huomiot on määritetty MARA-asetuksen liitteessä 2 seuraavasti:

¹⁾Hyödynnettävän asfalttimurskeen ja -rouheen enimmäismäärä maarakentamiskohteessa on 1 000 tonnia

²⁾Tuhkamursketien kerrospaksuus on asetettu täyterakenteen laskennalliselle paksuudelle

³⁾Taulukossa 1 kloridille, sulfaatille ja fluoridille asetettuja raja-arvoja ei sovelleta rakenteeseen, joka täyttää kaikki seuraavat edellytykset: sijaitsee enintään 500 m etäisyydellä merestä, rakenteen läpi suotautuvan veden purkautumissuunta on mereen sekä rakenteen ja meren välillä ei ole talousvedenottoon käytettäviä kaivoja

⁴⁾Tolueeni, etyylibentseeni ja ksyleeni (summapitoisuus)

⁵⁾Polyaromaattiset hiilivedyt: antraseeni, asenafteni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, kryseeni, naftaleeni ja pyreeni (summapitoisuus)

⁶⁾Fenoli, o-kresoli, m-kresoli, p-kresoli ja bisfenoli-A (summapitoisuus)

⁷⁾Polyklooratut bifenyylit kongeneerit 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 (summapitoisuus)

Liite 2. Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) liite 3 (Kaatopaikalle hyväksyttävän jätteen kelpoisuusvaatimukset).

Taulukko 1. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 2 säättämät raja-arvot pysyvän jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Aine/muuttuja	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta (L/S = 10 l/kg)
Arseeni (As)	0,5
Barium (Ba)	20
Kadmium (Cd)	0,04
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,5
Kupari (Cu)	2
Elohopea (Hg)	0,01
Molybdeeni (Mo)	0,5
Nikkeli (Ni)	0,4
Lyijy (Pb)	0,5
Antimoni (Sb)	0,06
Seleeni (Se)	0,1
Sinkki (Zn)	4
Kloridi (Cl ⁻)	800
Fluoridi (F ⁻)	10
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	1 000 ¹⁾
Fenoli-indeksi	1
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ²⁾	500
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ³⁾	4 000

Edellä olevan taulukon 1 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 2 seuraavasti:

¹⁾ Jätteen katsotaan täyttävän kelpoisuusvaatimuksen myös, jos sulfaattipitoisuus ei ylitä seuraavia arvoja: 1 500 mg/l (läpivirtaustestin ensimmäinen uutos uuttosuhteessa L/S = 0,1 l/kg) ja 6 000 mg/kg (uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg); pitoisuuden määrittämiseksi uuttosuhteessa L/S = 0,1 l/kg on käytettävä läpivirtaustestiä; pitoisuus uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg voidaan määrittää joko ravistelu- tai läpivirtaustestillä.

²⁾ Jos liuenneen orgaanisen hiilen raja-arvo ylittyy jätteen omassa pH:ssa, voidaan jäte vaihtoehtoisesti testata uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg pH:ssa 7,5–8,0; jätteen katsotaan täyttävän liuenneen orgaanisen hiilen kelpoisuusvaatimuksen, jos pitoisuus on enintään 500 mg/kg.

³⁾ Liuenneiden aineiden kokonaismäärän raja-arvoa voidaan soveltaa sulfaatin ja kloridin raja-arvojen sijasta.

Taulukko 2. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 3 säätämät raja-arvot pysyvän jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Aine/muuttuja	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	30 000 (3 %)
Bentseeni, tolueeni, etyylibentseeni ja ksyleenit (BTEX)	6
Polyklooratut bifenyyliä (PCB)	1
Mineraaliöljy (C10-C40)	500
Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)	40

Edellä olevan taulukon 2 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 3 seuraavasti:

¹⁾ Kongeneerien 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 kokonaismäärä.

²⁾ Yhdisteiden (antraseeni, asenaftteeni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, bentso(a)pyreeni, kryseeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, naftaleeni, pyreeni) kokonaismäärä.

Taulukko 3. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 4 säätämät raja-arvot tavanomaisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Muuttuja	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	50 000 (5 %)
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	800 ¹⁾

Edellä olevan taulukon 3 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 4 seuraavasti:

¹⁾ Uuttosuhteessa $L/S = 10$ l/kg joko jätteen omassa pH:ssa tai pH:ssa 7,5–8,0.

Taulukko 4. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 5 säättämät raja-arvot tavanomaisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Aine/muuttuja	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta ($L/S = 10$ l/kg)
Arseeni (As)	2
Barium (Ba)	100
Kadmium (Cd)	1
Kromi yhteensä (Cr_{kok})	10
Kupari (Cu)	50
Elohopea (Hg)	0,2
Molybdeeni (Mo)	10
Nikkeli (Ni)	10
Lyijy (Pb)	10
Antimoni (Sb)	0,7
Seleeni (Se)	0,5
Sinkki (Zn)	50
Kloridi (Cl^-)	15 000
Fluoridi (F^-)	150
Sulfaatti (SO_4^{2-})	20 000
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ¹⁾	800
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ²⁾	60 000

Edellä olevan taulukon 4 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 5 seuraavasti:

¹⁾ Jos liuenneen orgaanisen hiilen raja-arvo ylittyy jätteen omassa pH:ssa, voidaan jäte vaihtoehtoisesti testata uuttosuhteessa $L/S = 10$ l/kg pH:ssa 7,5–8,0; jätteen katsotaan täyttävän liuenneen orgaanisen hiilen kelpoisuusvaatimuksen, jos pitoisuus on enintään 800 mg/kg.

²⁾ Liuenneiden aineiden kokonaismäärän raja-arvoa voidaan soveltaa sulfaatin ja kloridin raja-arvojen sijasta.

Taulukko 5. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 6 säätämät raja-arvot tavanomaisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Muuttuja	Raja-arvo / muu vaatimus
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	5 % ¹⁾
pH	Vähintään 6,0
Haponneutralointikapasiteetti (ANC)	Aina tutkittava ja arvioitava

Edellä olevan taulukon 5 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 5 seuraavasti:

¹⁾ Laskettuna kuiva-ainetta kohti.

Taulukko 6. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 7 säätämät raja-arvot vaarallisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Aine/muuttuja	Raja-arvo, mg/kg kuiva-ainetta (L/S = 10 l/kg)
Arseeni (As)	25
Barium (Ba)	300
Kadmium (Cd)	5
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	70
Kupari (Cu)	100
Elohopea (Hg)	2
Molybdeeni (Mo)	30
Nikkeli (Ni)	40
Lyijy (Pb)	50
Antimoni (Sb)	5
Seleen (Se)	7
Sinkki (Zn)	200
Kloridi (Cl ⁻)	25 000
Fluoridi (F ⁻)	500
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	50 000
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ¹⁾	1 000
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ²⁾	100 000

Edellä olevan taulukon 6 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 5 seuraavasti:

¹⁾ Jos liuenneen orgaanisen hiilen raja-arvo ylittyy jätteen omassa pH:ssa, voidaan jäte vaihtoehtoisesti testata uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg pH:ssa 7,5–8,0; jätteen katsotaan täyttävän liuenneen orgaanisen hiilen kelpoisuusvaatimuksen, jos pitoisuus on enintään 1 000 mg/kg.

²⁾ Liuenneiden aineiden kokonaismäärän raja-arvoa voidaan soveltaa sulfaatin ja kloridin raja-arvojen sijasta.

Taulukko 7. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukon 8 säätämät raja-arvot vaarallisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavien aineiden enimmäispitoisuuksille (VNa 331/2.5.2013).

Muuttuja	Raja-arvo / muu vaatimus
Hehkutushäviö (LOI) ¹⁾	10 % ²⁾
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) ¹⁾	6 % ²⁾
Haponneutralointikapasiteetti (ANC)	Aina tutkittava ja arvioitava

Edellä olevan taulukon 7 huomiot on määritetty kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 taulukossa 5 seuraavasti:

¹⁾ On sovellettava joko hehkutushäviön tai orgaanisen hiilen kokonaismäärän raja-arvoa.

²⁾ Laskettuna kuiva-ainetta kohti.

Kaatopaikka-asetuksen (VNa 331/2.5.2013) liitteen 3 kohdassa 4 esitetään 34 §:n säätämät poikkeukset tiettyjen raja-arvojen korottamisesta. Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 kohdan 4 mukaan esitettyjä orgaanisen hiilen kokonaismäärän raja-arvoja on mahdollista soveltaa seuraaviin kohtiin:

1) taulukossa 2 oleva raja-arvo voidaan korottaa enintään kaksinkertaiseksi; maa-ainesjätteelle voidaan kuitenkin hyväksyä kolminkertainen raja-arvo, jos jätteen liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuus on enintään 500 mg/kg uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg joko jätteen omassa pH:ssa tai pH:ssa 7,5–8,0;

2) taulukoissa 3 ja 5 oleva raja-arvo voidaan korottaa enintään kaksinkertaiseksi vain, jos liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuus on enintään 800 mg/kg uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg joko jätteen omassa pH:ssa tai pH:ssa 7,5–8,0;

3) taulukossa 7 oleva raja-arvo voidaan korottaa enintään kolminkertaiseksi vain, jos jätteen liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuus on enintään 1 000 mg/kg uuttosuhteessa L/S = 10 l/kg joko jätteen omassa pH:ssa tai pH:ssa 7,5–8,0.

Kaatopaikka-asetuksen liitteen 3 kohdan 4 mukaan seuraavista raja-arvoista poikkeuksia ei ole luvallista myöntää:

- 1) taulukoissa 1, 4 ja 6 oleva liuenneen orgaanisen hiilen raja-arvo;
- 2) taulukossa 2 oleva bentseenin, tolueenin, etyylibentseenin ja ksyleenien raja-arvo;
- 3) taulukossa 2 olevat polykloorattujen bifenyyliden, mineraaliöljyn ja polyaromaattisten hiilivetyjen raja-arvot;
- 4) taulukossa 5 oleva pH:n raja-arvo;
- 5) taulukossa 7 oleva hehkutushäviön raja-arvo.

Taulukko 1. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulosten koonti MARA-asetuksen (843/2017) päällystetyn kenttärakenteen mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Liukoisuus (mg/kg LS = 10 l/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.2020 - 10.1.2021			10. - 24.1.2021			24.1.- 7.2.2021		
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	0,2
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	8,3	<4,0	<4,0
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi (Cr)	0,4	0,7	<0,1	0,3	1,5	<0,1	0,4	1,7	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Lyijy (Pb)	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	<0,1
Molybdeeni (Mo)	1,9	3,7	0,3	2,6	5,8	0,4	2,2	8,6	0,4
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Seleen (Se)	0,06	0,11	0,04	0,06	0,12	<0,03	0,04	0,18	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Vanadiini (V)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	1,7	<0,4	<0,4	2,3	0,4
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Fluoridi(F ⁻) ³⁾	<10	<12	<2,0	<12	<20	<2,0	<17	<19	<2,0
Kloridi (Cl ⁻) ³⁾	9 828	2 222	<160	15 527	3 477	<160	36545	3 753	<160
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻) ³⁾	17 779	20 710	563	20 881	39 604	950	12956	37 729	1063
Pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)									
Bentseeni	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
TEX ⁴⁾	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Naftaleeni	0,27	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,36	<0,20	<0,20
PAH-yhdisteet ⁵⁾	<0,3	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0
Fenoliset yhdisteet ⁶⁾	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
PCB-yhdisteet ⁷⁾	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,04	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
Öljyhiilivedyt C10–C40	<40	<40	<40	<40	<40	<40	43	<40	<40

Taulukko 1. Osa 3. Tuhkanäytteiden analyysitulosten koonti MARA-asetuksen (843/2017) päällystetyn kenttärakenteen mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Neutralointikapasiteetti jätteestä (mmol/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10. - 15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Haponneutralointikapasiteetti*	7 720	1 560	168	237	1 170	641	7 250	598	331	8 480	839	365
Liukoisuustestien uuttoliuosten lienneet määrät L/S=2												
pH	10,9	11,6	10,9	12,5	11	10,4	12,3	10,7	10,1	12,5	10,7	10,3
Liukoisuustestien uuttoliuosten lienneet määrät L/S=8												
pH	12,3	11	10,7	12,4	11	10,1	12,3	10,2	9,6	12,4	10	9,9

Taulukko1. Osa 4. Tuhkanäytteiden analyysitulosten koonti MARA-asetuksen (843/2017) päällystetyn kenttärakenteen mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Neutralointikapasiteetti jätteestä (mmol/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.2020 - 10.1.2021			10. - 24.1.2021			24.1.- 7.2.2021		
Haponneutralointikapasiteetti*	7 960	42	475	4850	1670	1070	6310	1910	969
Liukoisuustestien uuttoliuosten lienneet määrät L/S=2									
pH	12,5	12,6	10,7	12,5	11,4	11,2	12,1	11,4	11,1
Liukoisuustestien uuttoliuosten lienneet määrät L/S=8									
pH	12,3	12,3	10,5	12,4	10,9	11	12,3	10,8	10,6

Taulukko 2. Osa 1. Tuhkanäytteiden analyysitulosten koonti lannoiteasetuksen (24/11) mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Pitoisuus (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10. - 15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Arseeni (As)	28	52	12	10	31	<10	14	19	<10	10	24	10
Elohopea (Hg)	1	<0,2	<0,2	1	<0,2	<0,2	2,1	<0,2	<0,2	0,7	<0,2	<0,2
Kadmium (Cd)	1,6	3	<0,4	0,9	2,3	<0,4	1	1,2	0,4	0,5	1,3	0,5
Kromi (Cr)	48	89	47	20	85	26	32	48	11	17	48	19
Kupari (Cu)	77	180	67	52	150	38	50	59	25	22	59	29
Lyijy (Pb)	31	63	<5	12	40	<5	17	23	7	13	35	8
Nikkeli (Ni)	16	35	<10	10	39	<10	20	27	<10	<10	31	<10
Sinkki (Zn)	240	530	330	100	410	240	120	160	110	59	150	150

Taulukko 2. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulosten koonti lannoiteasetuksen (24/11) mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Pitoisuus (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.2020 - 10.1.2021			10. - 24.1.2021			24.1. - 7.2.2021		
Arseeni (As)	14	26	13	19	26	<10	11	31	<10
Elohopea (Hg)	1	<0,2	<0,2	1,3	<0,2	<0,2	0,8	<0,2	<0,2
Kadmium (Cd)	1,2	2,4	<0,4	1,8	2,5	<0,4	1,4	4,3	0,5
Kromi (Cr)	40	79	42	45	62	62	32	150	100
Kupari (Cu)	46	87	54	86	140	200	130	560	220
Lyijy (Pb)	20	45	5	41	74	11	33	110	11
Nikkeli (Ni)	18	35	11	18	30	19	15	60	20
Sinkki (Zn)	110	290	360	270	380	520	170	600	450

Taulukko 3. Osa 1. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10.-15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,3	1,5	0,7	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	4,1	<4,0	<4,0	4,6	<4,0	<4,0	4,9	<4,0	<4,0	4,8	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,7	1	<0,1	0,5	0,8	<0,1	0,3	0,3	<0,1	0,3	0,2	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	0,6	3,8	0,1	1,9	4,7	0,2	1,2	4,3	0,2	1,1	4,2	0,2
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Seleeni (Se)	0,06	0,14	<0,03	0,07	0,1	<0,03	0,04	0,09	<0,03	0,05	0,13	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl)	12 174	1907	<160	11 399	1 290	<160	7 662	1 175	<160	6 441	845	<160
Fluoridi (F ⁻)	<13	<13	<2,0	<25	<20	<2,0	<20	<40	<2,0	<10	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	13 765	25 225	621	17 867	18 977	410	14 724	30 311	560	17 067	35 500	563
Fenoli-indeksi	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ²⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ³⁾	62 000	46 000	1500	68 000	42 000	1 300	54 000	48 000	940	56 000	55 000	1 100

Taulukko 3. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.-10.1.2020			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	8,3	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,4	0,7	<0,1	0,3	1,5	<0,1	0,4	1,7	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	1,9	3,7	0,3	2,6	5,8	0,4	2,2	8,6	0,4
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	0,2
Seleeni (Se)	0,06	0,11	0,04	0,06	0,12	<0,03	0,04	0,18	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl)	9 828	2 222	<160	15 527	3 477	<160	36545	3753	<160
Fluoridi (F)	<10	<12	<2,0	<12	<20	<2,0	<17	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	17 779	20 710	563	20 881	39 604	950	12956	37729	1063
Fenoli-indeksi	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ²⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ³⁾	66 000	62 000	1 600	79000	69 000	2 600	99 000	65000	2300

Taulukko 4. Osa 1. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

[illegible]

Taulukko 4. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

[illegible]

Taulukko 4. Osa 3. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10.-15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,3	1,5	0,7	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	4,1	<4,0	<4,0	4,6	<4,0	<4,0	4,9	<4,0	<4,0	4,8	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,7	1	<0,1	0,5	0,8	<0,1	0,3	0,3	<0,1	0,3	0,2	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	0,6	3,8	0,1	1,9	4,7	0,2	1,2	4,3	0,2	1,1	4,2	0,2
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Seleeni (Se)	0,06	0,14	<0,03	0,07	0,1	<0,03	0,04	0,09	<0,03	0,05	0,13	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl)	12 174	1907	<160	11 399	1 290	<160	7 662	1 175	<160	6 441	845	<160
Fluoridi (F)	<13	<13	<2,0	<25	<20	<2,0	<20	<40	<2,0	<10	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	13 765	25 225	621	17 867	18 977	410	14 724	30 311	560	17 067	35 500	563
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ²⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ³⁾	62 000	46 000	1500	68 000	42 000	1 300	54 000	48 000	940	56 000	55 000	1 100

Taulukko 4. Osa 4. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.-10.1.2020			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	8,3	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,4	0,7	<0,1	0,3	1,5	<0,1	0,4	1,7	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	1,9	3,7	0,3	2,6	5,8	0,4	2,2	8,6	0,4
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	0,2
Seleeni (Se)	0,06	0,11	0,04	0,06	0,12	<0,03	0,04	0,18	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl)	9 828	2 222	<160	15 527	3 477	<160	36545	3753	<160
Fluoridi (F)	<10	<12	<2,0	<12	<20	<2,0	<17	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	17 779	20 710	563	20 881	39 604	950	12956	37729	1063
Liuennot orgaaninen hiili (DOC) ²⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ³⁾	66 000	62 000	1 600	79000	69 000	2 600	99 000	65000	2300

Taulukko 4. Osa 5. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10.-15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	1,5 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	1,6 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	1,2 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	0,9 paino-%	<0,6 paino-%
pH	12,3	11	10,7	12,4	11	10,1	12,3	10,2	9,6	12,4	10	9,9
Haponneutralointikapasi teetti (ANC)	7 720	1 560	168	237	1 170	641	7 250	598	331	8 480	839	365

Taulukko 4. Osa 6. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) tavanomaisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.-10.1.2020			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	1,9 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	2,2 paino%	<0,6 paino%	<0,6 paino%	2,9 paino%	<0,6 paino%	<0,6 paino%
pH	12,3	12,3	10,5	12,4	10,9	11	12,3	10,8	10,6
Haponneutralointikapasi teetti (ANC)	7 960	42	475	4850	1670	1070	6310	1910	969

Taulukko 5. Osa 1. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) vaarallisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10.-15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,3	1,5	0,7	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	4,1	4	<4,0	4,6	<4,0	<4,0	4,9	<4,0	<4,0	4,8	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,7	1	<0,1	0,5	0,8	<0,1	0,3	0,3	<0,1	0,3	0,2	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	0,6	3,8	0,1	1,9	4,7	0,2	1,2	4,3	0,2	1,1	4,2	0,2
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Seleeni (Se)	0,06	0,14	<0,03	0,07	0,1	<0,03	0,04	0,09	<0,03	0,05	0,13	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl ⁻)	12 174	1907	<160	11 399	1 290	<160	7 662	1 175	<160	6 441	845	<160
Fluoridi (F ⁻)	<13	<13	<2,0	<25	<20	<2,0	<20	<40	<2,0	<10	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	13 765	25 225	621	17 867	18 977	410	14 724	30 311	560	17 067	35 500	563
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ¹⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<2,0
Liunneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ²⁾	62 000	46 000	1500	68 000	42 000	1 300	54 000	48 000	940	56 000	55 000	1 100

Taulukko 5. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) vaarallisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Aine/muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.-10.1.2020			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Arseeni (As)	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1
Barium (Ba)	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	8,3	<4,0	<4,0
Kadmium (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Kromi yhteensä (Cr _{kok})	0,4	0,7	<0,1	0,3	1,5	<0,1	0,4	1,7	<0,1
Kupari (Cu)	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Elohopea (Hg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Molybdeeni (Mo)	1,9	3,7	0,3	2,6	5,8	0,4	2,2	8,6	0,4
Nikkeli (Ni)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Lyijy (Pb)	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	<0,1
Antimoni (Sb)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	0,2
Seleeni (Se)	0,06	0,11	0,04	0,06	0,12	<0,03	0,04	0,18	<0,03
Sinkki (Zn)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Kloridi (Cl ⁻)	9 828	2 222	<160	15 527	3 477	<160	36545	3753	<160
Fluoridi (F ⁻)	<10	<12	<2,0	<12	<20	<2,0	<17	<19	<2,0
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	17 779	20 710	563	20 881	39 604	950	12956	37729	1063
Liennut orgaaninen hiili (DOC) ¹⁾	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS) ²⁾	66 000	62 000	1 600	79000	69 000	2 600	99 000	65000	2300

Taulukko 5. Osa 3. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) vaarallisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.10.-15.11.2020			15.11. - 29.11.2020			29.11. - 13.12.2020			13. - 27.12.2020		
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) ¹⁾	1,5 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	1,6 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	1,2 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	0,9 paino-%	<0,6 paino-%
Haponneutralointikapasiteetti (ANC)	7 720	1 560	168	237	1 170	641	7 250	598	331	8 480	839	365

Taulukko 5. Osa 4. Tuhkanäytteiden analyysitulokset Kaatopaikka-asetuksen (331/2013) vaarallisen jätteen kaatopaikalle määritettyjen kelpoisuusvaatimusten mukaan.

Muuttuja (mg/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	27.12.-10.1.2020			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) ¹⁾	1,9 paino-%	<0,6 paino-%	<0,6 paino-%	2,2 paino%	<0,6 paino%	<0,6 paino%	2,9 paino%	<0,6 paino%	<0,6 paino%
Haponneutralointikapasiteetti (ANC)	7 960	42	475	4850	1670	1070	6310	1910	969

Liite 4. Laanilan biovoimalaitoksen tuhkanäytteiden kemialliset analyysitulokset tutkimuslaboratoriosta 1.

Taulukko 1. Osa 1. Tuhkanäytteiden analyysitulokset. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Raskasmetallipitoisuudet (Lannoite)		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
Alkuaine	Pitoisuus	27.10.-15.11.2020			15.11.-29.11.2020			29.11.- 13.12.2020			13.-27.12.2020		
Lyijy (Pb)	mg/kg ka	79	141	25	115	119	18	29	38	18	15	54	15
Seleen (Se)	mg/kg ka	<9	<9	<5	96	7	<4	<4	7	<3	<7	<7	<5
Arseeni (As)	mg/kg ka	45	58	<10	<21	<27	8	<10	29	<6	<11	18	<9
Elohopea (Hg)	mg/kg ka	<10	<10	<6	<13	<8	<5	<6	<6	<5	<9	<9	<7
Sinkki (Zn)	mg/kg ka	463	838	836	328	632	987	185	226	387	88	207	360,00
Kupari (Cu)	mg/kg ka	90	194	<51	<60	195	79	32	65	42	57	80	54
Nikkeli (Ni)	mg/kg ka	<94	120	<59	<102	94	<45	<54	<63	<43	<78	<87	<57
Koboltti (Co)	mg/kg ka	<442	<786	<188	<457	<536	<190	<254	<412	<155	<282	<589	<206
Rauta (Fe)	mg/kg ka	49 994	153 717	15 523	61 603	147 713	29 297	43 539	109 275	21 630	24 190	109 709,00	18 333,00
Mangaani (Mn)	mg/kg ka	1 674	3 808	1 135	3 047	4 067	2058	1 363	2 639	1 174	768	2 248,00	1 157,00
Kromi (Cr)	mg/kg ka	<70	<69	<90	<54	<74	<92	<85	<71	<105			
Vanadiini (V)	mg/kg ka	43	102	82	<25	110	152	60	107	140			
Kalsium (Ca)	mg/kg ka	195 250	37 770	43 836	133 346	41 511	68 774	222 158	41 099	58 000			
Barium (Ba)	mg/kg ka		<1 784	2 558	1 379	1 389	1 411	541	816	1 252			
Antimoni (Sb)	mg/kg ka		<605	<625	145	44	54	<34	<36	66			
Tina (Sn)	mg/kg ka		<613	<696	99	55	71	<32	38	70			
Kadmium (Cd)	mg/kg ka		344	<296	138	19	<14	<14	<15	<14			

Sulfaatin liukoinen pitoisuus (MARA)		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
Aine/muuttuja	Yksikkö												
Sulfaatti (SO42-)	mg/kg ka	16 855	28 190	630	32 000	59 000	780	32 000	60 000	1 200	24 800	43 700	761

Hehkutushäviö		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	%	7,3	1,6	0,6	9,9	9,8	0,2	1,2	8,6	0,03	11,8	1,2	0,01

Taulukko 1. Osa 2. Tuhkanäytteiden analyysitulokset. (Punaisella merkityt ylittävät raja-arvon.)

Raskasmetallipitoisuudet (Lannoite)		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
		13.-27.12.2020			27.12.2020-10.1.2021			10.-24.1.2021			24.1.-7.2.2021		
Alkuaine	Pitoisuus												
Lyijy (Pb)	mg/kg ka	15	54	15	31,66	99,54	43,18	82	198	48	89	195	76
Seleen (Se)	mg/kg ka	<7	<7	<5	<6,86	<6,69	<5,76	<6	<7	<5	<4	<5	<4
Arseeni (As)	mg/kg ka	<11	18	<9	14	21	<12	19	44	<12	12	37	<9
Elohopea (Hg)	mg/kg ka	<9	<9	<7	<8,15	<8,09	<7,17	<8	<8	<7	<6	<6	<5
Sinkki (Zn)	mg/kg ka	88	207	360,00	160,39	370,51	1 013,66	307	765	1109	305	661	954
Kupari (Cu)	mg/kg ka	57	80	54	72,4	106,12	85,02	96	210	173	157	488	387
Nikkeli (Ni)	mg/kg ka	<78	<87	<57	<78,92	<86,13	<63,77	<76	<89	<58	<52	<64	86
Koboltti (Co)	mg/kg ka	<282	<589	<206	<351	<496	<258	<315	<514	<205	<220	<402	<162
Rauta (Fe)	mg/kg ka	24 190	109 709,00	18 333,00	39 117,40	77 886,15	24 928,13	30774	82742	17582	33400	98121	22763
Mangaani (Mn)	mg/kg ka	768	2 248,00	1 157,00	1 177,73	2 251,26	2 227,55	1099	3034	1535	1240	3001	1541
Kromi (Cr)	mg/kg ka										<80	137	164
Vanadiini (V)	mg/kg ka										41	135	157
Kalsium (Ca)	mg/kg ka										174765	43787	93543
Barium (Ba)	mg/kg ka										675	1279	1192
Antimoni (Sb)	mg/kg ka										103	104	55
Tina (Sn)	mg/kg ka										65	67	61
Kadmium (Cd)	mg/kg ka										<16	<16	<14

Sulfaatin liukoinen pitoisuus (MARA)		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
Aine/muuttuja	Yksikkö												
Sulfaatti (SO42-)	mg/kg ka	24 800	43 700	761	18 999	22 017	663	20835	35337	700	15 237	45 778	986

Hehkutushäviö		Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
	%	11,8	1,2	0,01	7	2,1	0,09	3,6	2,8	0,6	0,1	3,6	0

Liite 5. Oulun yliopiston tutkimuslaboratoriossa saadut analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuudelle.

Taulukko 1. Osa 1. Tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksien analyysitulokset (m-%).

TULOS (m-%)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
27.10.-15.11.2020	64,962	68,4791	99,94883
15.11.-29.11.2020	66,852	67,354	99,987
29.11.-13.12.2020	67,235	63,821	99,848
13.-27.12.2020	63,905	63,105	99,826
27.12.2020-10.1.2021	63,893	67,233	99,937
10.-24.1.2021	64,486	68,421	99,959
24.1.-7.2.2021	66,87	67,664	99,986

Taulukko 1. Osa 2. Tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksien analyysitulokset (g/kg).

TULOS (g/kg)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
27.10.-15.11.2020	649,62	684,79	999,4883
15.11.-29.11.2020	668,52	673,54	999,87
29.11.-13.12.2020	672,35	638,21	998,48
13.-27.12.2020	639,05	631,05	998,26
27.12.2020-10.1.2021	638,93	672,33	999,37
10.-24.1.2021	644,86	684,21	999,59
24.1.-7.2.2021	668,7	676,6	999,86

Liite 6. Akkreditoidun laboratorion analyysitulokset tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksille.

Taulukko 1. Tuhkanäytteiden kuiva-ainepitoisuuksien analyysitulokset (m-%).

TULOS (m-%)	Lentotuhka	Kattilatuhka	Pohjatuhka
27.10.-15.11.2020	63,2	67,1	100
15.11.-29.11.2020	64,8	66,2	100
29.11.-13.12.2020	67	63,3	100
13.-27.12.2020	63,4	62,3	99,9
27.12.2020-10.1.2021	64	67,7	99,8
10.-24.1.2021	63,7	68,1	100
24.1.-7.2.2021	65,1	67,7	99,9